

Dietmar Letalick

Vindmätning med laserradar -- en förstudie

TOTALFÖRSVARETS FORSKNING SINSTITUT

Sensorteknik

Box 1165

581 11 Linköping

FOI-R--0588--SE

September 2002

ISSN 1650-1942

Användarrapport

Dietmar Letalick

Vindmätning med laserradar -- en förstudie

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Sensorteknik Box 1165 581 11 Linköping	Rapportnummer, ISRN FOI-R--0588--SE	Klassificering Användarrapport
	Forskningsområde 4. Spaning och ledning	
	Månad, år September 2002	Projektnummer E3866
	Verksamhetsgren 5. Uppdragsfinansierad verksamhet	
	Delområde 42 Spaningssensorer	
Författare/redaktör Dietmar Letalick	Projektledare Dietmar Letalick	
	Godkänd av Ove Steinvall	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning FMV	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig Dietmar Letalick	
Rapportens titel Vindmätning med laserradar -- en förstudie		
Sammanfattning (högst 200 ord) Plattformbaserade vindsensorer mäter vinden nära plattformen där vindfältet ofta är stort på grund av inverkan av plattform och omgivning. Ofta finns behov av fjärrmätning av vind, på avstånd från själva vindsensorn och i ett ostört vindfält. Det är också önskvärt att moderna plattformar kan uppträda signaturanpassat, vilket ställer krav på att vindsensorn inte tillför en röjande signatur till plattformen. Med en laserradar för vindmätning kan dessa krav uppfyllas. Genom att möjliggöra dynamisk atmosfärsanalys i realtid ökas förmågan att verka med precisionsvapensystem, då man får tillgång till detaljerade och aktuella data om vädersituationen, speciellt vinddata. Denna studie syftar till att samla information om teknikområdets möjligheter, begränsningar, kostnader, risker och realiserbarhet inom möjliga tillämpningsområden. Studien skall utgöra underlag för dialog med olika intressenter samt tillföra FMV kompetens inom området. I rapporten beskrivs tekniken för vindmätning med laserradar. Vi skisserar också tre klasser av vindmätande laserradarsystem för olika tillämpningar och med olika prestanda. På marknaden finns idag endast ett fåtal kommersiella leverantörer, varför vi föreslår att ett nationellt försökssystem realiseras för att användas till utvärdering av tekniken. Utformningen av ett sådant projekt skisseras.		
Nyckelord vindmätning, koherent laserradar		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 59 s.	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Sensor Technology P.O. Box 1165 SE-581 11 Linköping	Report number, ISRN FOI-R--0588--SE	Report type User report
	Research area code 4. C4ISR	
	Month year September 2002	Project no. E3866
	Customers code 5. Commissioned Research	
	Sub area code 42 Surveillance Sensors	
Author/s (editor/s) Dietmar Letalick	Project manager Dietmar Letalick	
	Approved by Ove Steinvall	
	Sponsoring agency Defence Material Administration	
	Scientifically and technically responsible Dietmar Letalick	
Report title (In translation) Wind sounding with laser radar -- a pre-study		
Abstract (not more than 200 words) Platform based wind sensors measures the wind close to the platform where the wind field often is disturbed by the platform and surroundings. There is often a need of remote sensing of the wind, away from the wind sensor and in an undisturbed wind field. Modern platforms should also have a low signature, which demands that the wind sensor does not significantly add to the platform signature. With a laser radar for wind sounding these requirements can be fulfilled. With dynamic analysis of the atmosphere in real time, the ability to act with precision weapons is increased, as detailed and updated data about the weather situation, especially the wind, is made available. The aim of the present study is to collect information about the possibilities and limitations of this technology, the costs, the risks and feasibility in possible applications. The study should form a basis for a dialogue with various interested parties and provide competence in the field to FMV. In this report the technology for wind sounding with laser radar is described. We also outline three classes of wind sounding laser radar systems for different applications and with various performance. Only a few commercial suppliers are available on the market today, hence we suggest that a national test-bed system is implemented for use in evaluation of the technology. The outline of such a project is given.		
Keywords wind sounding, coherent laser radar		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 59 p.	
Price acc. to pricelist		

Innehåll

INNEHÅLL	4
1 INLEDNING	5
2 SYSTEMKRAV	6
3 METODER FÖR VINDMÄTNING MED LASERRADAR	7
3.1 Koherent laserradar	7
3.2 Kontinuerliga system	8
3.3 Pulsade system	10
3.4 Andra laserbaserade metoder för vindmätning	11
3.5 Skillnader i prestanda och komplexitetsgrad	14
3.6 Signalbehandling	14
3.7 Uppskattning av kostnad	18
4 ATMOSFÄRSPARAMETRAR	19
4.1 Bakåtspridningskoefficienten β	19
4.2 Refraktiv turbulens	21
4.3 Regn	21
4.4 Moln, dimma och snö	22
5 PRESTANDA FÖR CLR-SYSTEM	23
5.1 SNR för ett CW-system	23
5.2 SNR för ett pulsat system (kort puls)	24
5.3 Bandbredd	24
5.4 Medelvärdesbildning	24
5.5 Några beräkningsexempel för SNR	25
6 MARKNADSUNDERSÖKNING	27
6.1 Exempel på laserbaserade försökssystem	27
6.2 Företag som tillverkar lasersystem för vindmätning	29
6.3 Konventionella vindmätare	33
7 DISKUSSION	34
7.1 Multifunktion	34
7.2 Systemlösningar för olika tillämpningar	35
8 FÖRSLAG TILL FORTSATT VERKSAMHET	37
9 SLUTSATSER	38
10 FÖRKORTNINGAR	39
11 REFERENSER	40
APPENDIX 1	44
Signal/brusförhållande vid koherent detektion	44
APPENDIX 2	46
SNR för vindmätning, det allmänna fallet	46
SNR för ett CW-system	48
SNR för ett pulsat system (kort puls)	48
Referenser	49
APPENDIX 3	50
Väderstatistik	50

1 Inledning

Dagens plattformsbaserade system för vindmätning mäter vinden nära plattformen där vindfältet ofta är stort på grund av inverkan av plattform och omgivning. Det finns ofta behov av fjärrmätning av vind, på avstånd från själva vindsensorn och i ett ostört vindfält. För att optimera användningen av vapen och motmedel är det också önskvärt med en större noggrannhet i vindmätningen än vad som kan erhållas med dagens system. Genom att kunna göra en dynamisk atmosfärsanalys i realtid ökas förmågan att verka med precisionsvapensystem, då man får tillgång till detaljerade och aktuella data om vädersituationen, speciellt vinddata. Exempelvis vindmätning strax före utskjutning av granater från olika system med indirekt eld eller direktriaktad eld. Med bra vinddata ökar också förmågan att göra aktuella och bra väderprognoser, inte minst vid NBC-händelser. Vidare är det önskvärt att moderna plattformar kan uppträda signaturanpassat, vilket ställer krav på att vindsensorn inte tillför en röjande signatur till plattformen. Med en laserradar för vindmätning kan dessa krav uppfyllas.

Denna studie syftar inledningsvis till att samla information om teknikområdets möjligheter, begränsningar, kostnader, risker och realiserbarhet inom möjliga användningsområden. Studien skall utgöra underlag för dialog med intressenter samt tillföra FMV kompetens inom området.

Ett laserradarsystem skulle på en given plattform kunna ha många potentiella funktioner. En realisering av dessa ger lasersystem med varierande komplexitet, beroende på vilka och hur många funktioner som skall lösas. Det finns sålunda önskemål om annan meteorologisk och ickemeteorologisk information, exempelvis mätning av molnbashöjd och sikt samt målinmätning. Speciellt är multifunktionsaspekten intressant; dvs. att i samma lasersystem implementera flera funktioner, exempelvis vindmätning, siktmätning, avståndsmätning, målinmätning, störsändning, kommunikation, BC-indikering mm. En laserradar för vindmätning kan även utnyttjas civilt, bl.a. för att höja säkerheten vid flygplatser.

Utvecklingen av teknik och kompetens inom området vindmätning med laserradar har även tillämpningar inom flygsäkerhet (t.ex. detektion av luftvirvlar, vindskjuvning, turbulens) samt inom meteorologi och miljövård. Allmänt kan sägas att forskning och utveckling kring lasersystem för vindmätning huvudsakligen bedrivs kring två tillämpningsområden, nämligen optiska luftdatasystem (eng: *optical air data system; OADS*), vanligen för placering på flygande plattformar, samt detektion och kartläggning av luftvirvlar orsakade av större flygplan (eng: *wake vortices*). OADS kan ersätta konventionella pitotrör för mätning av lufthastighet, vilket minskar radarmålarean och utökar flygenveloppen. Vidare kan attackvinkel och sidanblåsningsvinkel mätas med samma system. Kartläggning av luftvirvlar vid flygplatser orsakade av stora flygplan är viktigt för att undvika att mindre flygplan flyger in i virvlarna vid start och landning, något som annars kan få katastrofala följder. Detta kan också möjliggöra kortare separationsavstånd. Kunskap om luftvirvlarna kan också bidra till förbättrade flygplanskonstruktioner för att minska problemet. Ytterligare en tillämpning som studeras är mätning av vindfält i närheten av vindkraftverk. Syftet här är dels att verifiera turbinens effektivitet, samt att optimera verkningsgraden genom att anpassa rotorbladens inställning efter vindförhållandena. Även en kartering av förekommande vindfält är av intresse för optimal lokalisering av vindkraftverk.

2 Systemkrav

En laserradar för vindmätning kan komma att användas på både marina, flygburna och markbaserade plattformar. Systemet bör monteras väderskyddat innanför en huv eller plattformens skal och installationen skall utföras så att målsignaturen minimeras. Utrustningen skall vidare klara av de miljöer som finns på moderna plattformar vad det gäller stöt, EMP med mera.

Vindinformation används som indata till många olika system. För navigering och sjösäkerhet krävs en relativt grov angivelse på vindhastighet och vindriktning vid vattenytan. För vapen-systemen krävs mer detaljerad information om vindhastigheten på flera höjder och i vissa fall på flera avstånd från plattformen. Utdata från systemet skall vara vindhastighet och -riktning, samt mätpositioner och någon typ av godhetsmått. Exempelvis skall en indikering för realistiska värden ges. I tabell 1, som är hämtad från studiespecifikationen, redovisas en sammanställning av krav för respektive kravställare. Den minimala uppdateringsfrekvensen anges i samtliga fall till 0,5Hz.

Tabell 1. Sammanställning av krav på vindmätning i olika tillämpningar.

Tillämpning	Max horisontellt avstånd [m]	Max Höjd [m]	Maxfel vindhastighet [m/s]	Maxfel vindriktning [grader]	Avläsnings-täthet i höjddled [m]	Maxfel i avläsnings-täthet [±m]
Navigation	0	50	0,5	5	-	20
Vapen, typ 1	10 000	1 000	0,5	5	50	10
Vapen, typ 2	10 000	6 000	0,5	5	50	10
Vapen, typ 3	35 000	20 000	0,5	5	50	10

Även andra meteorologiska data är av intresse att kunna mäta tillsammans med vindinformation, se tabell 2. Exempelvis vid helikopterlandning behövs information om molnbashöjd och optisk sikt. Landning får inte utföras under en viss minsta molnbashöjd, gränshöjden. För att få en rimlig marginal skall systemet mäta molnbashöjd upp till dubbla gränshöjden med en noggrannhet på 10 %. För siktmätning är sikten för aktuella flyghöjder under inflygning intressanta, vilket innebär 0 – 300 m.

Tabell 2. Sammanställning av krav för utökade meteorologiska funktioner hos ett vindmätningssystem.

Mätparameter	Max horisontellt avstånd [m]	Max höjd [m]	Maxfel i avläst avstånd [m]	Maxfel i avläst sikt-förhållande [%]
Molnbashöjd	0	500	50	-
Sikt	1 000	300	10	5

Variationen i vindhastighet och vindriktning är relativt komplex och beror på en mängd faktorer, bl.a. gränsskiktets höjd, z_i , och omgivande terräng. Sålunda varierar vinden till storlek och riktning över tiden. För att utforma signalbehandling och presentation behöver behovet i olika tillämpningar utredas ytterligare. Det är inte givet att den momentana vindhastigheten och -riktningen är den i alla lägen bästa informationen. Kanske är det ofta bättre att få ett medelvärde över en viss tid samt uppgifter om variation samt största och minsta värde i ett tidsintervall. Som exempel kan nämnas att i flygtrafiksammanhang har ICAO (*The International Civil Aviation Organization*) fastställt följande krav: Momentan vindmätning med en uppdateringsfrekvens på 4 Hz och presentation med 1 Hz, horisontell vindvektor med noggrannhet på 1 knop (0,5 m/s) och 5°. Vindvariationen anges som ett medelvärde över 2 min och 10 min, samt största och minsta vindhastighet under 10 min. I det fortsatta arbetet bör ingå att även studera förekommande vindförhållanden i olika mätsituationer, för att på ett korrekt sätt kunna dimensionera ett vindmätningssystem.

3 Metoder för vindmätning med laserradar

Vindmätande lasersystem har studerats länge och många försökssystem har utvecklats. I regel har våglängder omkring 10 μm använts, vilket ger förhållandevis tunga och effektslukande system. Utvecklingen kring fasta-tillståndslasrar har öppnat möjligheten för mer kompakta, robusta och effektsnåla system. Genom att använda kortare våglängder (1,5-2 μm) blir också detektortekniken enklare, exempelvis behöver ej detektorn kylas, något som är fallet vid 10 μm våglängd. Det finns ett flertal laserbaserade metoder för vindmätning; i detta avsnitt beskrivs grunderna för vindmätning med lasersystem, speciellt med koherent laserradar.

3.1 Koherent laserradar

Principen för vindmätning med koherenta laserradarsystem baseras på Dopplereffekten. Partiklar i atmosfären reflekterar den utsända laserstrålningen, vilken erhåller ett frekvensskift som är proportionellt mot partiklarnas radiella hastighet (hastighetskomposanten längs laserstrålen) relativt lasersystemet. Med en s.k. koherent laserradar (CLR) kan detta dopplerskift mätas genom att den frekvensskiftade returstrålen blandas med en s.k. lokaloscillator (LO) vilken genereras internt i mätsystemet. Detta medför att frekvensskillnaden mellan de bägge fälten (strålarna) kan mätas. Om skillnadsfrekvensen bara beror på ett Dopplerskift ger en frekvensmätning ett direkt mått på den radiella hastigheten. Genom att göra mätningar i 2 (eller 3) riktningar är det möjligt att beräkna den 2-(3)-dimensionella vindvektorn (vindhastighet och -riktning). Notera att även direktdetekterande system i vissa fall kan mäta Dopplerskift, se avsnitt 3.4.4.

Vindmätning med hjälp av koherent laserradar har använts i forskningen nästan sedan laserprincipen demonstrerades. Den helt dominerande laserkällan för koherent laserradar har varit CO₂-lasern därför att koherent detektion kräver mycket frekvensstabila lasrar. Användningen av CO₂-lasrar kräver i allmänhet hög spänning och kylda detektorer. Dock har en snabb utveckling under det senaste decenniet av diodpumpade fasta-tillståndslasrar och fiberbaserade källor lett till att laserradarsystem utan ovan nämnda nackdelar har utvecklats. De är dessutom ofta mera kompakta än laserradarsystem baserade på CO₂-laser. Koherent laserradar beskrivs översiktligt i [1]; se även [2-4] samt referenserna däri. Teorin för koherenta system beskrivs i detalj i [5].

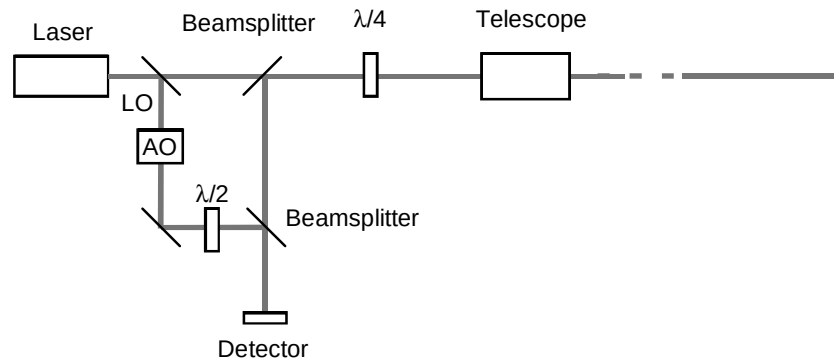
I Appendix 1 härleds ett uttryck för signal/brus-förhållandet (SNR) vid koherent detektion. För att få en enkel approximation kan vi anta deterministiska fält och ideal koherens (både tidsmässigt och rumsmässigt) blir SNR för hagelbrusdominerad detektion

$$SNR \approx \frac{\eta_{det} P_{mot} \lambda}{hcB}. \quad (1)$$

Här betecknar η_{det} detektorns kvantverkningsgrad, P_{mot} är mottagen effekt från målet, λ är ljusvåglängden, h är Plancks konstant, c är ljushastigheten och B är bandbredden för detektorn eller den efterföljande signalbehandlingskedjan. P_{mot} beror på den aktuella måltypen samt dess reflektionsegenskaper, avståndet till målet, våglängden och på optikstorleken. Känsligheten för ett system kan inte bli högre än då det är fullständigt dominerat av hagelbrus, dvs. *koherent detektion ger det högsta möjliga SNR för given lasereffekt.*

3.2 Kontinuerliga system

En principskiss på ett kontinuerligt koherent laserradarsystem, vanligen kallat CW-system (CW: *continuuous wave*) visas i figur 1. Vanligen används en monostatisk konfiguration, dvs. samma teleskop utgör både sändare och mottagare.



Figur 1. CW koherent laserradar. En del av utgående laserstrålning tappas av och används som LO.

I ett CW-system splittras ofta en del av den utgående laserstrålen av för att utnyttjas som LO. På detta sätt behövs ingen separat LO-laser vilket medför relativt enkla system. I sändar-/mottagaromkopplaren utnyttjas polarisation för att skilja utgående och inkommande strålning. I exemplet i figur 1 blir den linjärpolariserade strålningen cirkulärpolariserad efter passage genom $\lambda/4$ -plattan. När så den reflekterade strålningen ånyo passerar $\lambda/4$ -plattan blir den linjärpolariserad igen, men med polarisationsplanet vridet 90° i förhållande till utgående stråle. Den polarisationsberoende stråldelaren reflekterar den reflekterade strålningen mot detektorn där den kan blandas med LO-strålningen. Den på detektorn infallande LO-strålningen måste ha samma polarisation som den reflekterade strålningen för maximal signal. Om det inte finns någon frekvensskillnad mellan LO och utsänd strålning erhålls lika stora Dopplerskift för mål som rör sig med samma fart fast i motsatta riktningar, dvs. endast beloppet på Dopplerskiftet kan mätas. Genom att frekvensskifta LO-strålningen i förhållande till utsänd strålning (eller vice versa), t.ex. med en akusto-optisk modulator eller frekvensskiftare (AO), kan även riktningen hos den radiella vindhastighetskomponenten bestämmas.

CW-system har några unika karaktäristika. Exempelvis går det att åstadkomma enkla och relativt billiga system, bland annat därför att ingen separat LO-laser behövs. Dock är räckvidden för vindmätning ofta betydligt mindre än för pulssade system. Avståndsupplöst vindmätning kan åstadkommas genom fokusering av strålen, men det ger en ganska grov avståndsupplösning, speciellt på stora avstånd. Exempelvis kan en typisk laserradar som är fokuserad på 100 m ha en fokalvolym med en längd (Rayleighlängd) på omkring 10 m. Det innebär att detektionskänsligheten på 200 m avstånd endast reduceras med 20 dB jämfört med känsligheten i fokus [6]. Sålunda kan störande signaler uppkomma från bakomliggande fasta objekt som träffas av strålen eller när strålen träffa rök eller låga moln som ger mycket bakåtspridd strålning.

3.2.1 Bistatiska system

Genom att använda ett bistatiskt optiskt system (separat sändar- och mottagarteleskop) kan avståndsupplösningen för ett CW-system förbättras. Bakåtspridningen från partiklar utanför den väldefinierade probvolymen (dvs. den volym där sändar- och mottagarstrålarna överlappar varandra) undertrycks effektivt [6]. Det bistatiska arrangemanget leder till att man får en

liten och väldefinierad mätvolym (t.ex. 0,1 cm³ på 10 m avstånd), vilket är bra när man vill mäta vind vid en mycket exakt position (t.ex. i vindtunnlar).

3.2.2 Allmänt om CW-system för vindmätning

Utmärkande för ett fokuserat CW-system är också att SNR är approximativt oberoende av fokuseringsavstånd och optikstorlek. För ett fokuserat CW-system kan den mottagna effekten, i en enkel modell, skrivas som [7]

$$P_{mot} = \underbrace{\frac{P_{las}}{\pi w^2}}_{\text{irradians}} \cdot \underbrace{\frac{\pi D^2}{4R^2}}_{\text{rymdvinkel}} \cdot \underbrace{\beta_\pi}_{m^{-1}sr^{-1}} \cdot \underbrace{\Delta L \cdot \pi w^2}_{\text{effektivlängd} \cdot \text{målareal}} \quad (2)$$

Formeln ovan ges av enkla geometriresonemang. P_{las} är laserns uteffekt, w är strålradien i fokus, D är diametern på teleskopet, R är avståndet till fokus, β_π är bakåtspridningskoefficienten och ΔL är en effektiv längd på fokalvolymen. Rymdvinkeln är den rymdvinkel inom vilken mottagaren samlar upp reflekterad strålning. Hughes och Pike [7] anger den effektiva längden på fokalvolymen som

$$\Delta L = \frac{2\pi w^2}{\lambda}. \quad (3)$$

Vidare använder de som effektiv volym $\pi w^2 \Delta L$. Effektiv mottagen effekt blir då

$$P_{mot} = \frac{P_{las}}{\pi w^2} \frac{\lambda^2}{\pi w^2} \beta_\pi \cdot \frac{2\pi w^2}{\lambda} \pi w^2 = 2P_{las} \beta_\pi \lambda, \quad (4)$$

vilket ger ett mycket enkelt uttryck för SNR

$$SNR = \frac{2\eta_{det} P_{las} \beta_\pi \lambda^2}{hcB}. \quad (5)$$

I denna enkla modell blir SNR oberoende av såväl fokuseringsavstånd som storlek på optiken. Oberoendet av fokuseringsavstånd ges av att den effektiva volymen ökar lika mycket med ökande avstånd, som irradiansen och rymdvinkeln minskar. Oberoendet av optikstorlek kan förklaras på samma sätt. Emellertid minskar den effektiva volymen med ökande optikstorlek emedan irradiansen och rymdvinkeln ökar. I Appendix härleds ett uttryck för SNR för CW-system utan de antaganden som används ovan. Det visar sig att SNR beror på avstånd och optikstorlek, men att beroendet är svagt.

Till synes kan räckvidden vara mycket stor för ett CW-system eftersom SNR är approximativt oberoende av avstånd. Dock går det att åstadkomma en väldefinierad fokalvolym endast ut till ca 1 km för en realistisk optikstorlek (≈ 10 cm diameter) och således kan vindmätning i en väldefinierad volym bara utföras ut till ca 1 km avstånd.

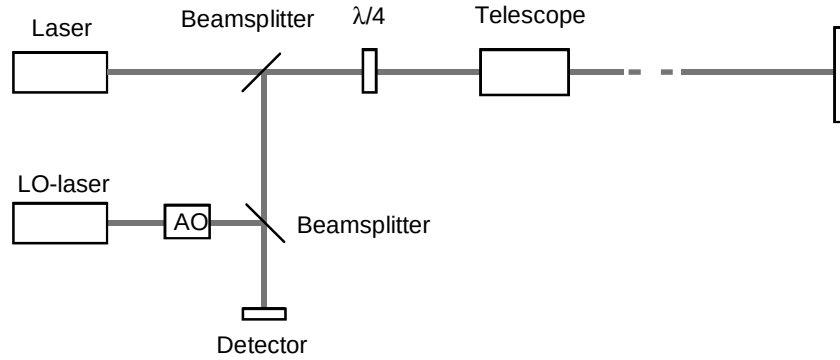
3.2.3 Sammanfattning av CW-system

- Del av den utgående laserstrålen utnyttjas som LO.
- Ingen separat LO-laser vilket medför relativt enkla system.
- AO-modulator ger frekvensskift mellan LO och utsänd strålning.
- Enkla och relativt billiga system.
- Räckvidd betydligt mindre än för pulssade system.

- Avståndsupplöst vindmätning (grov upplösning) sker genom fokusering av strålen (< 1 km).
- SNR ”oberoende” av avstånd.

3.3 Pulsade system

Ett pulsat koherent laserradarsystem kräver i princip en separat kontinuerlig LO-laser (se figur 2) eftersom den utgående laserstrålningen är pulsad.



Figur 2. Principskiss för ett pulsat CLR-system

Kravet på en separat LO-laser (CW-laser) leder ofta till att pulsade system blir relativt komplexa. Å andra sidan kan relativt långa räckvidder uppnås med pulsade lasrar. Det är också möjligt att åstadkomma en hög avståndsupplösning genom att använda korta pulser och tidsupplöst signalbehandling (oftast digital).

Den totala mättiden (T_{meas}) per uppskattning av vindhastighet kan skrivas

$$T_{meas} = MT_s, \quad (6)$$

där M är antal sampel och T_s är tiden mellan två sampel. Frehlich [8] använder följande uttryck för en Gaussisk puls (effekt):

$$P_{las}(t) = e^{-\frac{t^2}{\sigma_t^2}}, \quad (7)$$

där

$$\sigma_t = \frac{1}{\sqrt{8\pi}w_f}, \quad (8)$$

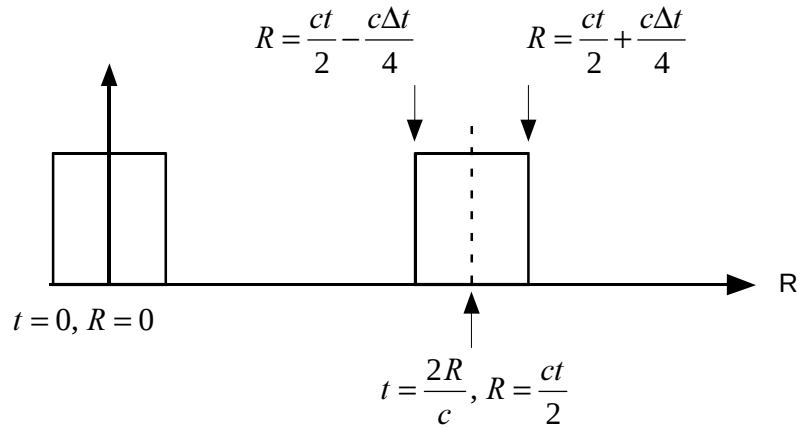
där w_f är signalens spektrala bredd (ges direkt av Fouriertransformen). Den fulla halvvärdesbredden (FWHM) av den utsända pulsen (i tiden) ges av

$$\Delta t = 2\sqrt{\ln 2}\sigma_t. \quad (9)$$

FWHM för den rektangulära avståndsviktningsfunktionen betecknas med Δr . För en rektangulär puls fås då, vid en given tid t , bidrag från spridare inom ett område av längden

$$\Delta r = \frac{c\Delta t}{2}, \quad (10)$$

dvs. vi har en problemlängd som är halva pulsens utsträckning (pga. fram och tillbaka). Vi kan formulera det på ett annat sätt: avståndsviktningsfunktionen motsvarar pulsprofilen komprimerad en faktor två. Vilken tid som motsvarar ett visst avstånd är något godtyckligt eftersom pulsen har en viss utsträckning, se figur 3.



Figur 3. Definition av tid-avstånd.

Avståndsupplösningen definieras av

$$\Delta R = \Delta r + \Delta p = \Delta r + \frac{cMT_s}{2}, \quad (11)$$

där Δp är avståndet som viktningsfunktionen flyttar sig under mättiden. Notera att bättre avståndsupplösning kan åstadkommas genom fokusering.

3.3.1 Sammanfattning av pulsade system

- Kräver (i princip) en separat LO-laser. Medför relativt komplexa system.
- Möjliggör långa räckvidder (5-10 km) med pulsade lasrar.
- Hög avståndsupplösning uppnås genom korta pulser och tidsupplöst signalbehandling.
- Hög känslighet.

3.4 Andra laserbaserade metoder för vindmätning

3.4.1 EML (enhanced mode lidar)

EML är i princip en CW koherent laserradar men med bivillkoret att det endast är en partikel åt gången som ska bidra till signalen [9, 10]. Detta kan åstadkommas genom att fokusera laserstrålen på ett kort avstånd. Om endast en partikel är närvarande i fokalvolymen fås ett högre SNR för EML jämfört med CW CLR för samma uteffekt för lasern:

$$\frac{SNR_{EML}}{SNR_{CW}} = \frac{16}{\pi \rho_p V}, \quad (12)$$

där ρ_p är partikeltätheten och V är fokalvolymens storlek [9]. Förstärkningen i SNR för EML jämfört med CW CLR beror således på $\rho_p V$ som motsvarar antalet partiklar i volymen. Om partikeltätheten är liten kan således ett högre SNR fås med EML jämfört med CW CLR. Detta medger att en lägre uteffekt för lasern kan användas.

Förutom att en relativt låg uteffekt kan användas verkar EML-system ha förutsättningar att kunna bli små och kompakta. En möjlig nackdel är att villkoret att endast en partikel är närva-

rande i mätvolymen förutsätter en kraftig fokusering, vilket kräver relativt stor optik samt kort fokuseringsavstånd. För realistisk storlek på optiken blir i själva verket fokuseringsavståndet 1-2 m vilket för många plattformar innebär mätning i en störd luftström [9].

Uppdateringshastigheten för mätningarna kommer också att variera med partikeltätheten. För att uppnå en konstant uppdateringshastighet bör geometrin förändras med förändringar i partikeltäthet, vilket är ett signifikant praktiskt problem. Emellertid, i de fall då en varierande och möjligen låg uppdateringshastighet kan accepteras är EML-konceptet synnerligen intressant.

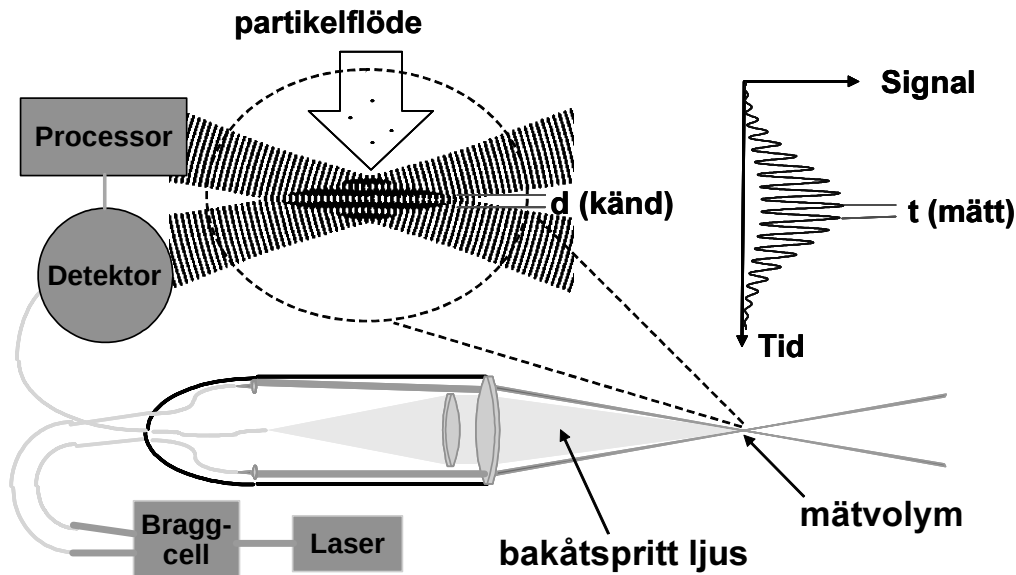
Enkelpartikel-detektion och vindmätning har även studerats vid FOI med ett fiberbaserat 1,55 μm CLR-system [11, 12]. Resultaten är mycket lovande, t.ex. detekterades enkelpartiklar på tiotals meters avstånd. Emellertid kvarstår många frågeställningar att studera, exempelvis uppdateringshastighetens beroende på olika variabler såsom partikelfördelning, vindhastighet mm.

3.4.2 "Sheet-pair"-system

Principen för ett så kallat "Sheet-pair"-(SP)-system är enkel tidmätning. Två laserstrålar sveps i var sitt parallellt plan. En partikels passagetid för sträckan mellan planen mäts vilket ger hastigheten vinkelrätt mot planen. Liksom för EML-system går det att åstadkomma relativt enkla, små och robusta system med SP-metoden. Dock är fokuseringsavståndet litet vilket medför mätning i störd luft. Titan-Spectron har utvecklat och flugit SP-system baserade på GaAlAs lasrar [13, 14]. Det testade SP-systemet byggde på direktdetektion vilket medför känslighet för bakgrundsstrålning. Koherenta system är i praktiken helt okänsliga för bakgrunds ljus. SP-metoden kräver ett antal mer eller mindre avancerade algoritmer för signalbehandlingen, exempelvis för att identifiera när en partikel har passerat ett plan. Därefter måste samma algoritm fungera när partikeln passerar nästa plan och dessutom avgöra om det är samma partikel som passerade det första planet.

3.4.3 Laser-doppler-anemometri

För tillämpningar i närfältet kan laser-doppler-anemometri (LDA) användas. I LDA, som även kallas "fransmetoden", bildar två korsande laserstrålar ett interferensmönster kring en liten volym i rummet, se figur 4. När en eller flera partiklar passerar detta mönster kommer den spridda strålningen att moduleras med en frekvens som är proportionell mot tvärhastigheten relativt strålarna. Metoden används för mätning av gas- och vätskeflöden i industriella sammanhang. I motsats till koherent detektering kräver fransmetoden att någon partikel sprider väsentligt mer än andra eller att enkelpartikeldetektion föreligger. Hög noggrannhet ställer höga krav på strålstabilitet.



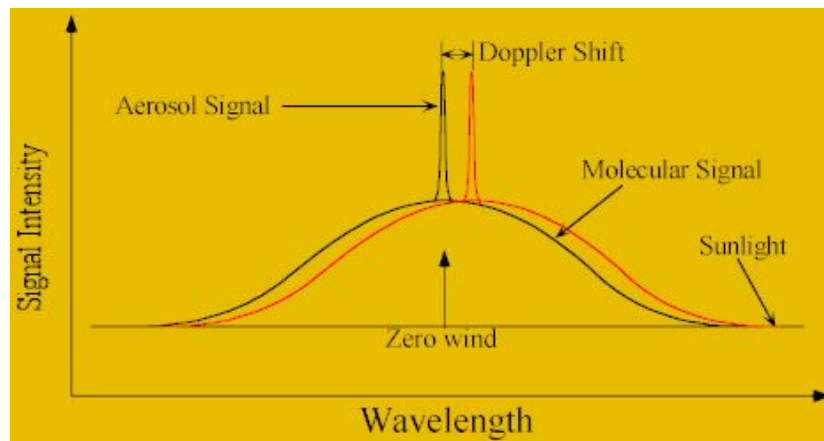
Figur 4. Principen för laser-doppler-anemometri.

3.4.4 Kantmetoden

En annan direktdetekterande metod som på senare tid rönt visst intresse t.o.m. för global vindmätning från satellit är den s.k. "kantmetoden" (eng: *edge technique*) [15-17]. Metoden baseras på mätning av bakåtspridd strålning från atmosfären med laservåglängden centrerad på kanten av ett mycket smalt optiskt filter. Små ändringar i våglängd (frekvens) pga. Dopplerskift hos det tillbakaspridda laserljuset resulterar, till följd av den skarpa kanten, i en relativt stor signalamplitudändring. Dopplerskiftet, och därmed vindhastigheten, mäts således genom mätning av skillnader i amplituder för både den utgående pulsen och den mottagna strålningen. Därmed erhålles en mätning fri från laserfrekvens- och/eller filterjitter samt drift. Genom att använda två etalonger (filter) med motsatta lutningar och med laservåglängden centrerad till mitten på de båda kanterna kan mätnoggrannheten nära nog fördubblas jämfört med ett filter (*double edge*). För att uppnå en hög noggrannhet måste filtrens responskurvor vara mycket skarpa. Kraven på upplinjeringen av filtren, exempelvis Fabry-Perot-etalonger, blir därför stora. Gemensamt för kantmetoden och LDA är de begränsas av optisk bakgrund eller detektorbrus.

3.4.5 MOADS

MOADS är ett optiskt luftdatasystem (OADS) där M står för *molecular*. Principen är ungefärligen densamma som för ett direktdetekterande Doppler system (kantmetoden) fast man använder UV-laser (våglängd omkring 266 nm) för att få tillräcklig effektivitet i molekylspridningen. Syftet är att eliminera behovet av partiklar samt möjligheten att även mäta tryck och temperatur. I ett sådant system utnyttjas bakåtspridning från molekyler (Rayleigh-spridning) istället för från aerosolpartiklar, se Figur 5. Syftet är att nå högre känslighet, speciellt för tillämpningar på hög höjd, där aerosolkoncentrationen (och därmed bakåtspridningskoefficienten för partikelspridning) är otillräcklig. Med samma instrument kan också temperatur mätas. Den absoluta temperaturen bestäms av spektralbredden på signalreturen från molekylerna. Då lufttemperaturen stigen vibrerar molekylerna fortare, vilket ger en breddning av spektret. Luftens densitet kan bestämmas ur storleken på signalen; i tätare luft finns fler molekyler som sprider laserstrålningen tillbaka. Lufttrycket kan beräknas ur mätningarna av densitet och temperatur.



Figur 5. Dopplerskiftet i bakåtspridningen från molekyler (Rayleigh-spridning) utnyttjas i MOADS. Även Mie-spridning (aerosolspridning) kan utnyttjas vid tillräcklig aerosolkoncentration.

3.5 Skillnader i prestanda och komplexitetsgrad

Av diskussionen i tidigare avsnitt framgår att olika teknik har skiljande prestanda med olika fördelar och nackdelar. I tabell 3 redovisas en sammanställning av några egenskaper, med dagens teknik och rimliga ekonomiska förutsättningar, för de olika metoderna. Generaliseringar är svåra att göra och tabellen bör därför endast ses som en indikation. Det finns ofta varianter på de olika teknikerna vilket medför att ytterligare något "ja" är möjligt i tabellen. Exempelvis kan man tänka sig att göra SP-system som kan mäta på större avstånd än 10 m. Emellertid gör vi bedömningen att kraven på strålstabilitet och uteffekt för lasrarna då blir stora.

Tabell 3. Sammanställning av några egenskaper för olika tekniska lösningar på laservindmätare. (Ett frågetecken betyder att egenskapen är svårbedömd.)

Teknik	Mätavstånd >10 m	Möjlighet till långräckviddig mätning	Okänslig för bakgrund	Enkel, kompakt	Mätning vid låga partikel- koncentrationer
CW-CLR	ja	nej	ja	ja	tveksamt
Puls-CLR	ja	ja	ja	nej	ja
EML	nej	nej	ja	ja	ja
SP	nej	nej	nej	ja	?
LDA	nej	nej	nej	ja	?
Kantmetoden	ja	ja	nej	nej	tveksamt
MOADS	?	?	nej	?	ja

Valet av teknik måste baseras på kravbilden för mättillämpningen. Om vindmätningen skall ske mer än 10 m från plattformen/sensorn ter sig EML, SP, LDA samt förmodligen MOADS mindre lämpliga.

3.6 Signalbehandling

Vindhastigheten beräknas ur uppmätt medelfrekvens för den från aerosoler bakåtspridda strålningen. Noggrannheten för en frekvensmätning eller uppskattning bestäms av flera faktorer. En faktor är mottagarens karakteristik och, där det är tillämpligt, av signalbehandlingsalgoritmer. Både analoga och digitala tekniker kan användas för frekvensuppskattning. Ofta används analog teknik för kontinuerliga system medan digital teknik oftast används för pulssade system.

3.6.1 Kontinuerliga system (CW)

Det finns ett stort antal möjliga mottagare för CW-system som utnyttjar analoga principer [18]:

- Spektrumanalysator
- "Instantaneous frequency measurement"-mottagare (IFM)
- Kompressionsmottagare (t.ex. SAW-analysator)
- Akusto-optisk Braggcellmottagare
- Mottagare med A/D-omvandling (populärt kallad digital mottagare)
- Filterbankmottagare

En jämförelse mellan tre olika mottagare presenteras av Rothermel et al. [19]. Utmärkande för ett CW-system är den kontinuerliga signalen vilket medger att spektra (innehållande hastighetsinformation) kan medelvärdesbildas i stor utsträckning. Dessutom kan laserstrålningens spektrum vara mycket smalt, vilket medger att noggranna vindhastighetsmätningar är möjliga. CW-system tillåter emellertid inte långa räckvidder och hög avståndsupplösning, vilket pulssade system kan göra.

Ofta domineras noggrannheten för ett CW-system av mätgeometrin. Även vindens spatiella och temporala struktur påverkar mät noggrannheten. Banakh et al. [20] har analyserat mät noggrannhet under olika atmosfärförhållanden. Noggrannheten beror på atmosfärens tillstånd (stabilt, instabilt, skiktat etc.). Dessutom bidrar mottagarens frevensnoggrannhet till mät noggrannheten. Faktorerna SNR, mättid, grad av medelvärdesbildning och linjebredd för lasern bidrar naturligtvis också.

+Standardavvikelsen för frekvensen (σ_f) i en radar- (eller laserradar-) mätning kan under vissa förutsättningar skrivas som [21]

$$\sigma_f = \frac{\sqrt{3}}{\pi\tau\sqrt{2SNR}\sqrt{T_{meas}B}}, \quad (13)$$

där τ är pulslängden (rektangulär puls). Ekvationen ovan gäller inte alltid men den kan användas för att studera trender. Så kan exempelvis τ vara av närmast godtycklig storlek för ett CW-system och således kan en mycket stor mät noggrannhet för frekvens, och därmed vindhastighet, åstadkommas. För att beräkna σ_f i varje enskilt fall måste alla detaljer kring signalbehandlingen beaktas.

3.6.2 Pulsade system med digital signalbehandling

Trots att en del av ovanstående mottagare kan användas som processorer används nästan uteslutande digital teknik för pulssade system. Med digital teknik avses här A/D-omvandlare och efterföljande digital processor. Det finns ett stort antal algoritmer som implementeras endera i hårdvara eller mjukvara. Gemensamt för algoritmerna är att de antingen är baserade på Fouriertransform eller autokorrelation.

Nedan beskrivs två metoder, periodogram (PG) och puls-par (PP), som används för frekvensuppskattning. Dessa båda metoder har den stora fördelen att de inte kräver förhandskunskap om signalen. Dessutom är de inte så beräkningsintensiva som andra algoritmer. Emellertid resulterar de i begränsade noggrannheter jämfört med vad som är

⁴ C. Karlsson, P.-O. Arntzen, G. Hansson, S. Zyra, A. Hågård, T. Lampe och J. Stålhand, "Förstudie och demonstratorförslag av ett optiskt luftdatasystem (VILA-projektet)", FOA-R--99-01276-408--SE, november 1999.

teoretiskt möjligt. Ytterligare en metod, liksom PP baserad på autokorrelation, nämligen poly-puls-par (PPP) beskrivs också. PPP-metoden används av många olika forskargrupper eftersom den ger mätnoggrannheter som ligger nära de teoretiskt möjliga. Metoden kräver emellertid att den spektrala vidden på signalen är känd.

Det dynamiska området för en A/D-omvandlare anges ofta som [22]

$$DR = \frac{P_{max}}{P_{min}} = 2^{2b}, \quad (14)$$

där b är antalet bitar. P_{max} är den maximala effekten som en signal kan ha utan att begränsas av A/D-omvandlaren. P_{min} är minimal signaleffekt och motsvarar här en signal med en storlek (topp-topp) som motsvarar en bit. För en 8-bitars A/D blir dynamiska området ≈ 48 dB.

3.6.2.1 Periodogram (PG)

Den A/D-omvandlade signalen $x(nT_s)$ Fouriertransformeras enligt

$$X(k/NT_s) = \sum_{n=0}^{N-1} x(nT_s) e^{-i2\pi nk/N} = \sum_{n=0}^{N-1} x(nT_s) e^{-i2\pi f n T_s}, \quad (15)$$

där k/NT_s är frekvensen vid index k ($=0, 1, 2, \dots$). Frekvensupplösningen ges av $1/NT_s$. En sökning av frekvensen för vilken amplituden $X(f)$ eller effekten $S(f)$ (=periodogrammet) i spektret är maximum ger en uppskattning på medelfrekvensen. En bättre uppskattning fås om en tyngdpunktsberäkning (f_{CM}) görs i ett visst område (ΔF) kring toppen i spektret:

$$f_{CM} = \frac{\sum_{\Delta F} S(f) f}{\sum_{\Delta F} S(f)}. \quad (16)$$

Ofta medelvärdesbildas flera spektra i samma avståndslucka för att minska inverkan av speckler. Beräkning av 0:e, 1:a och 2:a momentet ger signaleffekt, medelfrekvens och varians. Notera att medelfrekvensen representerar medelvärdet för spridarnas hastighet viktat med deras målarea. Om kvadratroten ur variansen bildas fås ett mått på den spektrala vidden på signalspektrum. Denna beror bl.a. på hastighetsspridningen i upplösningvolymen. En stor fördel med Fouriertransformen är att man enkelt kan subtrahera känt brus.

Exempelvis Henderson *et al.* [23] använde PG-metoden när de demonstrerade ett koherent 2 μ m laserradarsystem. De digitaliserade signalen med 100 MS/s under 1,28 μ s varefter de beräknade periodogrammet. Före beräkning av 0:e, 1:a och 2:a momentet medelvärdesbildades 10 spektra i varje avståndslucka. Vid beräkning av medelfrekvensen användes endast de värden i spektret som var inom 5 MHz och 20 % från toppvärdet.

3.6.2.2 Puls-par (PP)

Puls-paralgoritmen (även kallad *single-lag autocovariance* [SLA]) bygger på en uppskattning av autokorrelationsfunktionen:

$$R_l = \frac{1}{N} \sum_{n=l}^{N-l} x^*(nT_s) x((n+l)T_s), \quad (17)$$

där $x(nT_s)$ är en komplex signal. Den komplexa signalen kan digitalt bestämmas ur den reella genom att beräkna den analytiska signalen [24] (den imaginära delen av den analytiska signalen är Hilberttransformen av den reella signalen).

Genom att använda argumentet av autokorrelationsfunktionen för 1:a fördröjningen (R_1) kan medelfrekvensen uppskattas

$$f = -\left(\frac{1}{2\pi T_s}\right) \arg(R_1). \quad (18)$$

En stor fördel med PP-algoritmen är den ringa mängden beräkningar som krävs för att få en frekvensuppskattning, åtminstone om den analytiska signalen finns tillgänglig. Metoden påstås också ge god noggrannhet [25].

Rye et al. [1] har visat att PP-metoden leder till mätosäkerheter i samma storleksordning som de teoretiskt möjliga (den s.k. *Cramer-Rao lower bound*, *CRLB*) när SNR är högt eller när vidden på signalspektrum upptar en stor del av totala bandbredden. Emellertid är goda prestanda vid låga SNR samt smala toppar i spektra viktigt. PPP-algoritmen uppvisar bra prestanda även under dessa förhållanden.

3.6.2.3 Poly-pulspar (PPP)

En utvidgning av PP-algoritmen är Poly-pulsparalgoritmen (PPP). Metoden kallas även för *multi-lag autocovariance* (MLA) -metoden. Autokorrelationsfunktionen (AKF) beräknas för flera fördröjningar varefter den viktas med en funktion (W_n) som motsvarar den förväntade amplituden på autokorrelationsfunktionen för den bakåtspridda signalen. Detta motsvarar en faltning av det mottagna spektret med en funktion som antas matcha signalspektret. PPP-algoritmen motsvarar således ungefär ett matchat filter. Den viktade autokorrelationsfunktionen Fouriertransformeras och medelfrekvensen bestäms. Denna procedur kan skrivas som

$$X(k/KT_s) = \sum_{n=1}^N R_n \cdot W_n \cdot e^{-i2\pi nk/KT_s}. \quad (19)$$

PPP-metoden kan ge problem med tvetydighet eftersom det otvetydiga intervallet minskar med större fördröjningar.

3.6.2.4 CRLB och ML-uppskattning

ML betyder maximal sannolikhet (*maximum likelihood*). En ML-metod (utan systematisk avvikelse) är en metod som ger uppskattningar för en storhet med en varians som är lika med CRLB. Under vissa förutsättningar är både PP-algoritmen och PG-algoritmen ML-uppskattare. Närmare bestämt: PP-algoritmen är en ML-uppskattare då signalens spektrala vidd i gränsen är stor, medan PG-algoritmen är en ML-uppskattare då signalen går mot infinitesimalt liten vidd [26]. För ”normala” förhållanden gäller detta dock inte. För en allmän beskrivning av ML-uppskattare och CRLB se t.ex. [27]. ML-uppskattning av medelfrekvens för laserradardata behandlas i t.ex. [8].

Man kan modellera täthetsfunktionen (PDF) för frekvensuppskattningarna som en Gaussisk fördelning plus ett golv

$$PDF(f) = b_f T_s + \frac{1 - b_f}{\sqrt{2\pi}\sigma_f} e^{-\frac{(f - \bar{f})^2}{2\sigma_f^2}}, \quad (20)$$

där b_f är andelen felaktiga uppskattningar, $\bar{f}$ är medelfrekvensen och σ_f är standardavvikelsen [8]. Denna modell baseras på kvalitativa experimentella observationer.

3.7 Uppskattning av kostnad

Kostnaden för ett operativt laservindmätningssystem är mycket svår att uppskatta. I hög grad beror kostnaden på vilken teknik som väljs. Dock finns en potential att utveckla enkla system där priset inte avskräcker. Exempelvis vid kontakter med företaget OADS uppgavs att man hade som designmål ett pris på under 10 000 USD vid stora serier (>1000 enheter) för ett koherent vindmätningssystem med räckvidd ut till ca 50-100 m. De kostnadsdrivande komponenterna är laseroscillator och fiberförstärkare, om man väljer ett fiberbaserat 1,55 μm -system. Eftersom man idag inte har något färdigt system vid OADS, var man förtegen om hur prisbilden ser ut idag.

CTI har tidigare angivit priset på sitt pulssade Wind-Tracer-system till ca 350 000 USD för sändare/mottagare samt 125 000-200 000 USD för signalprocessning/presentation. Man får väl säga att ett sådant system placeras i andra änden av prestandaskalan, jämfört med ett enkelt CW-system. I sändar-/mottagarenheten ingår ett antal kostnadsdrivande komponenter, bl.a. laseroscillatör.

4 Atmosfärparametrar

4.1 Bakåtspridningskoefficienten β

I atmosfären finns aerosoler, dvs. stoftpartiklar vilka bildar vad som ofta betecknas som dis. Dessa svävar i luften och sprider strålning, liksom partiklar eller vattendroppar i moln, dimma, regn och snö. En förutsättning för att erhålla en tillräcklig mottagarsignal i en laser-radar för vindmätning är att atmosfären innehåller tillräckligt många, tillräckligt stora partiklar som sprider laserstrålning tillbaka till mottagaren. Bakåtspridningskoefficienten (β_π) för atmosfärspartiklarna anger hur mycket strålning som sprids bakåt.

4.1.1 Definitioner och aerosolmodeller

Den optiska transmissionen t_a i aerosoler kan oftast (och speciellt för monokromatisk strålning) med god approximation beräknas med Beers lag:

$$t_a(r) = e^{-\alpha_e r}, \quad (21)$$

där r är avståndet och α_e är den s.k. extinktionskoefficienten [m^{-1}] eller oftast [km^{-1}]. Extinktionskoefficienten α_e kan uttryckas som summan av komponenten α_s , som motsvarar spridning och α_a , som motsvarar absorption:

$$\alpha_e = \alpha_s + \alpha_a. \quad (22)$$

Spridningskoefficienten β_π för bakåtspridning, med dimensionen [$\text{m}^{-1}\text{sr}^{-1}$], ger ett mått på hur stor del av den spridda strålningen från ett avståndselement, som riktas inom ett rymdvinkel-element i bakåtriktningen.

Koefficienterna α_e och β_π är båda funktioner av våglängden λ på ett sätt, som beror av partiklarnas storleksfördelning, form och brytningsindex. Med en viss förenkling kan man säga att för partiklar, som är små i förhållande till våglängden, avtar α_e och β_π starkt med ökande våglängd, medan stora partiklar ger ett svagt våglängdsberoende eller dispersion. Dis med relativt små partiklar ger värden, som avtar starkt med våglängden i området 0,5 - 15 μm , medan dimma med betydligt större partiklar ofta ger värden, som avtar svagt och sålunda är nästan lika stora i IR-området som i det visuella. Nederbörd (regn och snö) består av stora partiklar med svag eller ingen dispersion i det optiska våglängdsområdet. Kvoten β_π/α_e beror också av partiklarnas egenskaper, men för överslagsberäkningar kan den antas vara konstant vid varierande värden på α_e . För dis har värden på kvoten mellan 0,01 och 0,1 sr^{-1} rapporterats [28].

Den sikten som observeras vid väderstationer, är ofta det enda underlag som finns för att beräkna α i atmosfärens gränsskikt. Den definition av sikt som ofta används i beräkningar, innebär att sikten V_M (*meteorological range*) definieras som den sträcka, som ger 2 % visuell transmission. Då blir α_V , vilket är beteckningen för α_e vid våglängden 0,55 μm :

$$\alpha_V = \frac{3,9}{V_M}. \quad (23)$$

För den visuellt observerade sikten, V_O , har WMO (World Meteorological Organization) fastställt att man skall räkna med att den motsvarar 5% transmission, vilket innebär att

$$\alpha_V = \frac{3,0}{V_O}. \quad (24)$$

Detta medför också att $V_M = 1,3 V_O$.

Om man vet hur α_e beror av våglängden λ , kan man använda sikten och därmed α_V för att beräkna $\alpha_e(\lambda)$. En empirisk metod, som är baserad på statistiskt analyserade mätdata från en transmissometer, har utvecklats vid FOI. Extinktionskoefficienten α_e för ett antal givna våglängder kan beräknas enligt

$$\alpha_e(\lambda) = R_V(\lambda)\alpha_V, \quad (25)$$

där $R_V(\lambda)$ är den s k IR-faktorn. Den kan approximativt beräknas med en regressionsformel, som en linjär funktion av ett antal väder- och tidsparametrar [29, 30]. I en enkel version ingår enbart sikt och temperatur som ingångsparametrar.

4.1.2 Parametervärden i gränsskiktet (0 - 2 km)

I gränsskiktet (0-2 km höjd) används statistiska värden för sikt från väderobservationer från Landsort under 20 år (1973 - 92). Med dessa observationer som underlag har siktvärden V_{20} , V_m resp V_{80} beräknats med hjälp av FOI:s aerosolmodell. Dessa siktvärden definieras på följande sätt: V_{20} är ett värde på den observerade sikten V_O så att $V_O < V_{20}$ i 20 % av observationerna; V_m är medianvärdet och för V_{80} gäller: $V_O < V_{80}$ i 80 % av observationerna. Följande årsmedelvärden för hela perioden har beräknats:

$$V_{20} = 6,5 \text{ km} \quad V_m = 17,6 \text{ km} \quad V_{80} = 29 \text{ km}.$$

Medianvärdet V_m för den observerade sikten är 17,6 km. Detta innebär att motsvarande värde för V_M (*meteorological range*) är ungefär 23 km, vilket råkar vara ett standardvärde i Modtran (Lowtran) och ofta används i beräkningar för s k typfall. Om man delar upp observationerna efter årstider och gör motsvarande beräkningar, ser man att V_{20} - och V_m -värdena är högre under sommaren, 9 resp 20 km, och lägst under vintern, 5 resp 15 km.

Vid markytan kan vi anta följande värden på β_π vid våglängden 2 μm [28-31]:

$$\beta_{20}(2) \approx 9,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-1}\text{sr}^{-1} \text{ (i 20 \% av fallen)}$$

$$\beta_m(2) \approx 2,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-1}\text{sr}^{-1} \text{ (i 50 \% av fallen)}$$

$$\beta_{80}(2) \approx 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-1}\text{sr}^{-1} \text{ (i 80 \% av fallen)}$$

Dock är variansen stor för höjdprofiler av β_π . En väsentlig orsak till detta är att den naturliga variationen i aerosolinnehåll hos olika luftmassor är stor. Aerosolinnehållet beror av vädret på ett komplicerat och till stor del okänt sätt. Bristen på mätdata och osäkerheten om hur befintliga data skall tolkas bidrar till osäkerheten. Värdet av β_π , och speciellt våglängdsberoendet, beror av partiklarnas storleksfördelning, form och brytningsindex, vilka ofta är okända.

För att bedöma tillgängligheten hos en laservindmätare har statistik över sikt, molnmängd och vind för hav, kust och inland i norra, mellersta respektive södra Sverige studerats. Några representativa orter har valts ut enligt tabell 4. Den meteorologiska sikten kan tas som en fingervisning om räckvidden för ett laservindmätsystem. Ur meteorologiska data, se Appendix 3, kan utläsas att sikten är bättre än 5 km under 95% av tiden under året på de flesta orterna. Årstidvariationerna är dock stora.

Tabell 4. *Orter i Sverige för vilka väderstatistik har studerats.*

	Södra Sverige	Mellersta Sverige	Norra Sverige
Hav	Falsterbo	Vinga	Holmögadd
Kust	Landsort	Söderhamn	Luleå
Inland	Jönköping	Malung	Gunnarn
Fjäll	–	–	Storlien

4.2 Refraktiv turbulens

Optisk (refraktiv) turbulens kan försämra prestanda signifikant för koherenta laserradar-system. Refraktiv turbulens beror på fluktuationer i brytningsindex (spatiellt och temporalt) som uppkommer pga. turbulens i atmosfären. Brytningsindex-fluktuationerna modifierar (distorderar) en inkommande vågfront vilket försämrar interferensen mellan målstrålning och LO-strålning i ett koherent laserradarsystem. Styrkan på fluktuationerna anges av struktur-konstanten för brytningsindex, C_n^2 . Turbulensen ger upphov till olika effekter såsom strålvandring, strålbreddning och intensitetsfluktuationer (alla härrörande ur vågfrontsdistorsion). Detaljerad information om refraktiv turbulens finns i [32, 33].

För turbulensens höjdberoende finns ett antal modeller [33]. Här modellerar vi turbulensens höjdberoende som [34]

$$C_n^2(h) = C_n^2(1) \frac{1}{h^{2/3}} \quad (\text{natt}) , \quad (26)$$

$$C_n^2(h) = C_n^2(1) \frac{1}{h^{4/3}} \quad (\text{dag}). \quad (27)$$

I beräkningarna av SNR i avsnitt 5 används beroendet för natt eftersom det ger den största negativa inverkan av turbulensen. Vi har också ansatt $C_n^2 = 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ vid höjden 1 m, vilket kan anses vara relativt stark turbulens. C_n^2 beror på atmosfärsförhållanden och tid på dygnet. C_n^2 kan vara mellan 10^{-12} och $10^{-17} \text{ m}^{-2/3}$ [34].

4.3 Regn

4.3.1 Bakåtspridning och dämpning

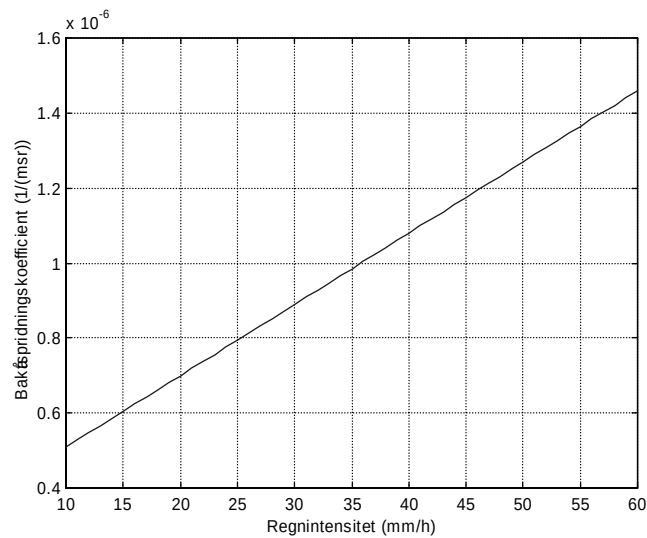
Targ et al. [35] använde interpolerade data för extinktionskoefficienten från mätningar vid 0,63; 3,5 och 10,6 μm [36] för att beräkna dämpningskoefficientens beroende på regnintensiteten R_{int} (vid våglängden 2,09 μm). Targ anger följande uttryck för är dämpningskoefficienten i α_{regn} (m^{-1})

$$\alpha_{regn} = 3,9 \cdot 10^{-5} \cdot R_{int} + 6,7 \cdot 10^{-4}, \quad (28)$$

där R_{int} är regnintensiteten i mm/h. Notera att detta uttryck bara gäller för R_{int} mellan 10 och 60 mm/h. Enligt Targ är förhållandet mellan bakåtspridningskoefficienten och dämpningskoefficienten oberoende av våglängd och ges av

$$\beta_{regn} = 4,8 \cdot 10^{-4} \alpha_{regn} = 1,9 \cdot 10^{-8} \cdot R_{int} + 3,2 \cdot 10^{-7}, \quad (29)$$

i $\text{m}^{-1}\text{sr}^{-1}$. Ovanstående formel är beräknad med Mie-teori för $\lambda=10,6 \mu\text{m}$, brytningsindex=1,18-0,065i, och droppradie>20 μm . För regnintensiteter mellan 10 och 60 mm/h blir β_{π} i storleksordningen $10^{-6} \text{ m}^{-1}\text{sr}^{-1}$, se figur 6. Det står inget i [35] om regnintensitet kopplat till droppstorlek och fördelningar.



Figur 6. Bakåspridningskoefficienten för olika regnintensiteter.

4.4 Moln, dimma och snö

4.4.1 Bakåspridning och dämpning

Dimma och moln ger stor dämpning och bakåspridning. I dimma och moln är fuktigheten hög och partiklarna är stora och består till en mycket stor del av vatten, dvs. dessa kan betecknas som droppar. Med moln avses här låga moln med så hög temperatur att vattnet inte bildat iskristaller. Höga moln, cirrus, består av iskristaller. Dimma anses råda när sikten är mindre än 1 km. Alltså gäller:

$$\alpha_V = 3,0/V_O > 3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1} \text{ i dimma.}$$

Kvoten β_π/α_e i dimma kan troligen beräknas relativt väl enligt Mie-teori, eftersom dropparna kan antas vara nära sfäriska. Vid 2 μm och en sikt på 1 km (100 m) kan man förvänta sig att β_π är i storleksordningen $10^{-4} \text{ m}^{-1}\text{sr}^{-1}$ ($10^{-3} \text{ m}^{-1}\text{sr}^{-1}$). Bakåspridningskoefficienten i snö verkar vara jämförbar med den i regn vid samma nederbördsintensitet [37].

5 Prestanda för CLR-system

I detta avsnitt diskuteras bl.a. signal/brusförhållandet (SNR). Systemparametern SNR är en kritisk parameter för ett systems prestanda, t.ex. för räckvidden och för noggrannheten i uppskattningen av vindhastighet. I det allmänna fallet måste hänsyn tagas till dämpning och refraktiv turbulens i atmosfären, vågfrontsmatchning och polarisationsmatchning mellan LO och reflekterad målstrålning, avståndsberoende systemkänslighet mm. Frehlich och Kavaya [5] har härlett generella formler för SNR för CLR-system. I allmänhet finns inte några analytiska lösningar. I ett specialfall, nämligen för ett Gaussiskt matchat monostatiskt system, fås emellertid analytiska lösningar [4] vilka härleds i Appendix 2. Här redovisas endast de erhållna slututtrycken. Om vi antar att bakåtspridningskoefficienten β_π är oberoende av avstånd, får vi det allmänna uttrycket för SNR:

$$SNR(t) = \frac{\eta_{det}\eta_\theta T_{opt}\beta_\pi\lambda}{hcB} \int_0^\infty P_{las} \left(t - \frac{2R}{c} \right) \left[T_{atm}(R) \right] \frac{\pi w_0^2}{R^2 \left[I + \frac{w_0^2}{\rho_0^2(R)} + \left(\frac{\pi w_0^2}{\lambda R} \right)^2 \left(I - \frac{R}{F} \right)^2 \right]} dR . \quad (30)$$

De ingående variablerna förklaras i tabell 5.

Tabell 5. Förklaring av variabler som ingår i ekvation (30).

Variabel	Betydelse
η_{det}	detektorns kvantverkningsgrad
η_θ	förlustfaktor på grund av skanning (för skannande system)
β_π	bakåtspridningskoefficienten
h	Plancks konstant
c	ljushastigheten
B	bandbredd för detektor och signalbehandling
$P_{las}(t, R)$	avståndsviktningfunktionen pga. den temporala pulspprofilen
T_{atm}	transmissionen genom atmosfären
α_e	extinktionskoefficienten
F	fokuseringsavstånd (vågfrontsradie)
ρ_0	transversell koherenslängd
w_0	strålradien ($1/e^2$, intensitet) vid sändar-/mottagaroptiken
T_{opt}	total transmission genom optiken
R	avståndet till målet

5.1 SNR för ett CW-system

CW-system karakteriseras av en konstant lasereffekt vilket betyder att P_{las} kan flyttas utanför integralen i ekvation (30). Ofta är räckvidden för vindmätande CW-system begränsad beroende bl.a. på den relativt låga uteffekten från CW-lasrar och därmed kan atmosfärspåverkan (refraktiv turbulens och dämpning) försummas i vindsammanhang. Ekvation (30) kan då förenklas och lösas analytiskt (se Appendix 2), så att

$$SNR = \frac{\eta_{det}\eta_\theta\beta_\pi P_{las}\lambda^2}{hcB} \left(\frac{\pi}{2} + \arctan \left(\frac{\pi w_0^2}{\lambda F} \right) \right) . \quad (31)$$

5.2 SNR för ett pulsat system (kort puls)

Även SNR för ett pulsat system kan beräknas enligt ekvation (30). Ofta antas att pulsen är tillräckligt kort för att $T_{\text{atm}}(R)$ ska vara konstant inom pulslängden [5] och då antar ett givet värden för ett specifikt avstånd. Ekvation (30) kan då förenklas och integralen kan lösas (se Appendix 2) så att

$$SNR = \frac{\eta_{\text{det}} \eta_{\theta} T_{\text{opt}} \beta_{\pi} \lambda E_{\text{las}} c \pi w_0^2 [T_{\text{atm}}(R)]^2}{2hcBR^2 \left[1 + \frac{w_0^2}{\rho_0^2(R)} + \left(\frac{\pi w^2}{\lambda R} \right)^2 \left(1 - \frac{R}{F} \right)^2 \right]}, \quad (32)$$

där E_{las} är den utsända pulsenergin. Ekvation (32) används ofta för att uppskatta prestanda för vindmätande pulsat CLS-system [5].

5.3 Bandbredd

Signalspektrums detaljerade utseende och storlek bestäms av ett antal faktorer, t.ex. pulslängd och Dopplerbreddning. Bandbredden B som kommer in i uttrycken för SNR ovan kan endera vara sökbandbredden B_w , dvs. totala bandbredden för signalbehandlingen, eller ”smalbandbredden” B_n , som motsvarar bredden på signalspektret. B_n kommer således också att motsvara den relevanta brusbandbredden vid spektralanalys. För en exakt analys ska den exakta responskurvan för signalbehandlingen och den fullständiga funktionen för signalspektret inkluderas i SNR-beräkningarna.

Fouriertransformen ger en bestämd bredd givet en bestämd pulslängd med en bestämd temporal funktion. Om pulsen är Gaussisk i tiden med $FWHM_t = \Delta t$ blir den spektrala bredden $FWHM_f$

$$FWHM_f = \frac{2 \ln 2}{\pi FWHM_t}. \quad (33)$$

För en 300 ns lång puls blir $FWHM_f \approx 1$ MHz. För hårda mål har reflekterad strålning ett temporalt utseende som är en kopia av pulsprofilen. Då målet är distribuerat, t.ex. aerosoler i atmosfären, ger varje enskild partikel en kopia. Eftersom avståndet mellan partiklarna är slumpmässigt blir också faserna vid mottagaren för de individuella reflekterade fälten slumpmässiga. Signalen uppvisar därför en s.k. speckelkaraktär [38]. Speckelmodulationens tidskala ges av pulstiden [8].

Om en puls på 350 ns används kan en bandbredd på 3 MHz vara lämplig att användas i beräkningar. Det tillåter ± 1 m/s spridning i vindhastigheten utan att signaleffekt förloras i någon nämnvärd utsträckning.

5.4 Medelvärdesbildning

Medelvärdesbildning kan ske i tidsplanet (summering av amplituder) såväl som frekvensplanet (summering av effekter). I tidsplanet krävs kontroll av fasen för att medelvärdesbildningen ska vara effektiv. Då det gäller vindmätning är det allmänhet inte möjligt att ha kontroll på fasen, varför ofta medelvärdesbildning i frekvensplanet tillämpas. Medelvärdesbildningen ska ske för signaler med ursprung i samma mätvolym, annars kan medelvärdesbildningen leda till en spektral breddning. Medelvärdesbildning kan ge en högre detektions sannolikhet och mindre falsklarmssannolikhet, dvs. ett högre effektivt SNR (SNR_{eff}). Då det

gäller vindmätning talas ofta om andelen dåliga uppskattningar, vilket är ekvivalent med falsklarmssannolikheten.

Ofta antas förbättringen av det effektiva SNR ske som kvadratroten ur antalet medelvärdesbildningar

$$SNR_{eff} = SNR \cdot \sqrt{N} . \quad (34)$$

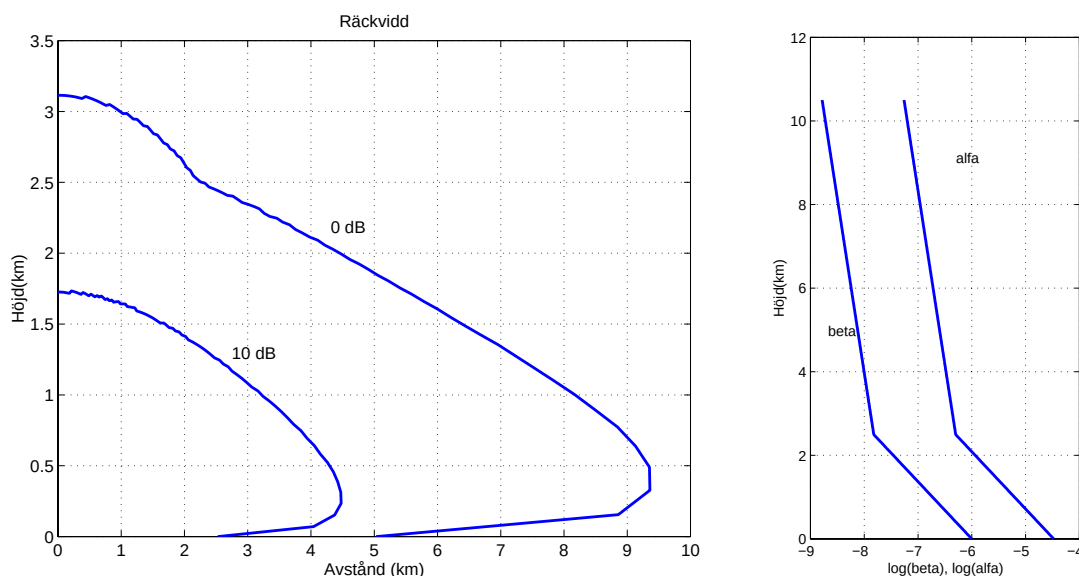
Denna ekvation är inkluderad i beräkningsexemplen nedan. Ibland ökar dock SNR_{eff} snabbare än $\sqrt{N}$ [18: 39].

Ett annat sätt att göra medelvärdesbildning är att mäta i många riktningar och anpassa enligt minsta-kvadratmetoden. Det är *inte* ekvivalent med medelvärdesbildningen ovan, men många mätningar i olika riktningar kan utnyttjas för att minska andelen dåliga uppskattningar och/eller öka mätnoggrannheten. Tillsammans med en bra algoritm för kvalitetsmått på data (uteslutning av dåliga data) bör många mätriktningar och minsta-kvadratmetoden ge bra resultat.

5.5 Några beräkningsexempel för SNR

5.5.1 Markbaserat pulsat system

I figur 7 visas ett räckviddsdiagram för två olika SNR-gränser. De parametrar som har använts redovisas i tabell 6. Definitionen av räckvidd kan variera beroende på tillämpning; i någon tillämpning räcker $SNR=0$ dB, i andra krävs kanske 10 dB. Höjdprofilen för β_π kommer från [40]. Det finns en stor variation i β_π . Ofta kan β_π vara större än den redovisade profilen i figur 7. Den använda höjdprofilen motsvarar klart väder.



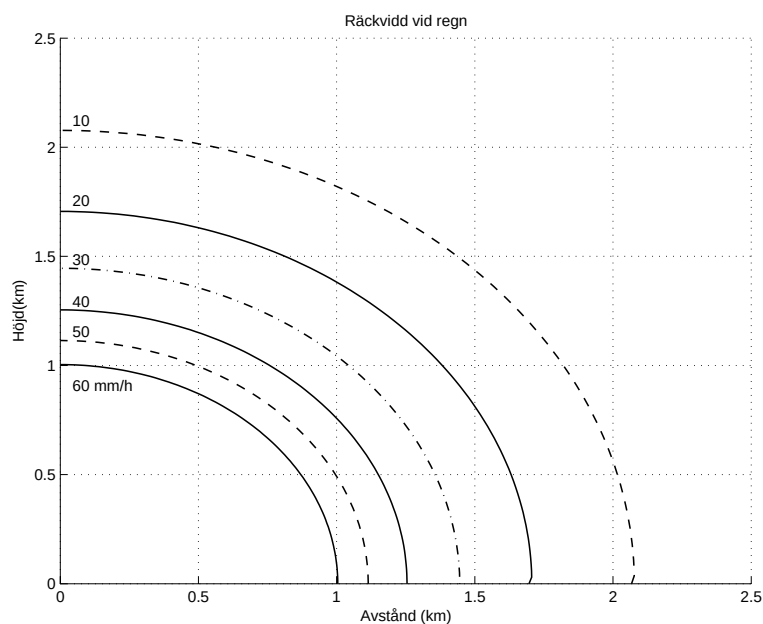
Figur 7. Till vänster visas räckvidden för ett pulsat system. Två SNR-krav är indikerade, 0 dB samt 10 dB. Fem medelvärdesbildningar har antagits. I beräkningarna har $C_n^2 = 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ vid höjden 1 m och $\alpha_e = \beta_\pi / 0,03 \text{ m}^{-1}$ använts. Till höger visas de använda höjdprofilerna för β_π och α_e . I figuren är x-axeln $\log(\beta_\pi)$ och $\log(\alpha_e)$. Notera att figurerna har olika höjdskalor.

Notera den refraktiva turbulensens negativa inverkan på räckvidden nära markytan. Notera också brytpunkten vid höjden 2,5 km för 0 dB-kurvan, vilket beror på att β_π avtar långsammare för höjder över 2,5 km i den använda höjdprofilen för β_π . Parametrarna som använts i beräkningarna redovisas i tabell 6.

Tabell 6. Storheter och värden för beräkning av SNR (Figur 7 och figur 8).

Variabel	Beteckning	Värde	Kommentar
Våglängd	λ	2,02 μm	Tm:LuAG
Pulsenergi	E_{las}	2,5 mJ	
Pulslängd	Δt	300 ns	
Transmission optik	T_{opt}	0,2	
Kvantverkningsgrad	η_{det}	0,6	
Förlustfaktor	η_θ	1	Begränsad avsökningshastighet
Bandbredd	B	3 MHz	
Antal pulser	N	5	
Strålradi	w_0	33 mm	10 cm optik
Fokuseringsavstånd	F	∞	Kollimerat system

Räckvidden minskar med ökande regnintensitet. Den största minskningen sker för små elevationsvinklar då situationen förändras från regnintensitet 0 mm/h till 10 mm/h, se figur 7 och figur 8.

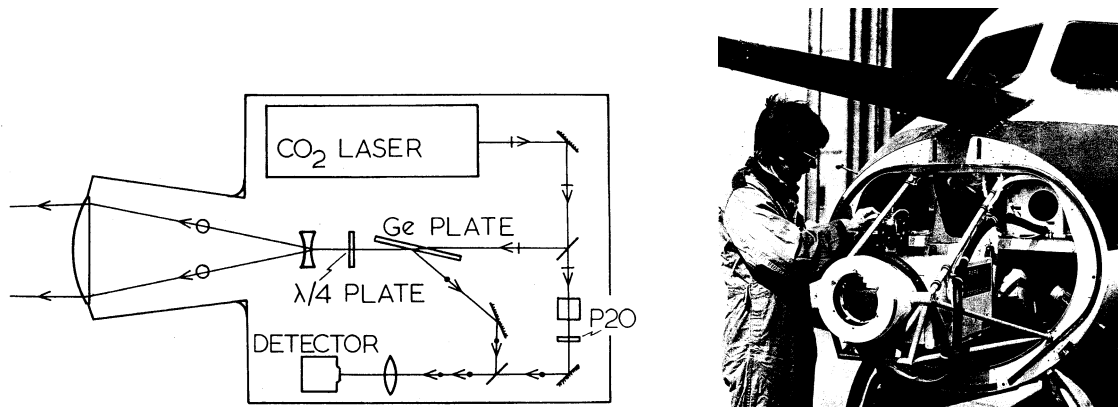


Figur 8. Räckvidd för olika regnintensiteter. Lägsta regnintensiteten ger längst räckvidd. SNR=0 dB har använts som gräns för räckvidden. I beräkningarna har $C_n^2=10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ vid höjden 1 m och $\alpha_e=\beta_\pi/0,00048 \text{ m}^{-1}$ använts.

6 Marknadsundersökning

6.1 Exempel på laserbaserade försökssystem

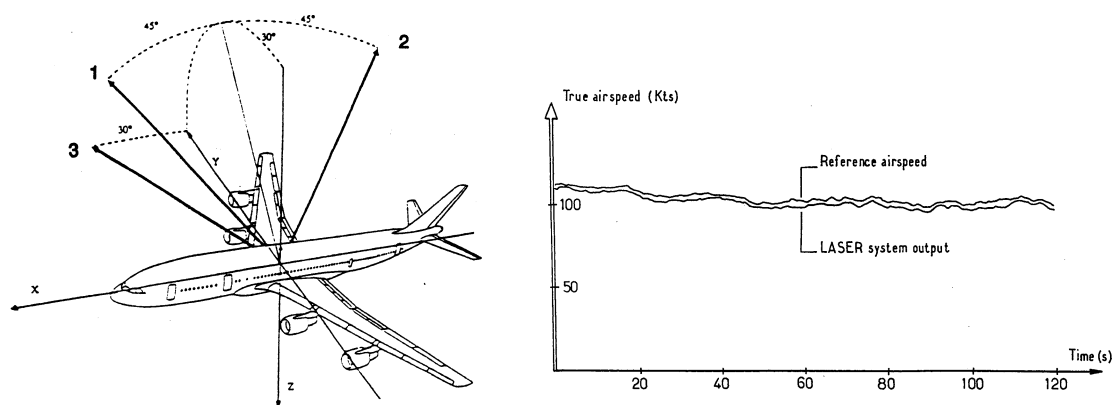
Ett tidigt CW-system för fartmätning för flygplan var LATAS (*laser true airspeed system*) [41, 42], se figur 9.



Figur 9. Strålgången i LATAS. Sändar-/mottagar-switchen bygger på reflektion i Brewstervinkeln mot germanium. Till höger syns LATAS monterat i ett HS-125 flygplan.

LATAS uppges vara (ha varit) ett robust system som har flugits mycket. Mätningar av lufthastigheter på upp till 327 m/s (635 knop) på upp till 13 km höjd har rapporterats. LATAS har flugits i relativt stor omfattning för att studera bakåtspridningens storlek på olika höjder [41, 43].

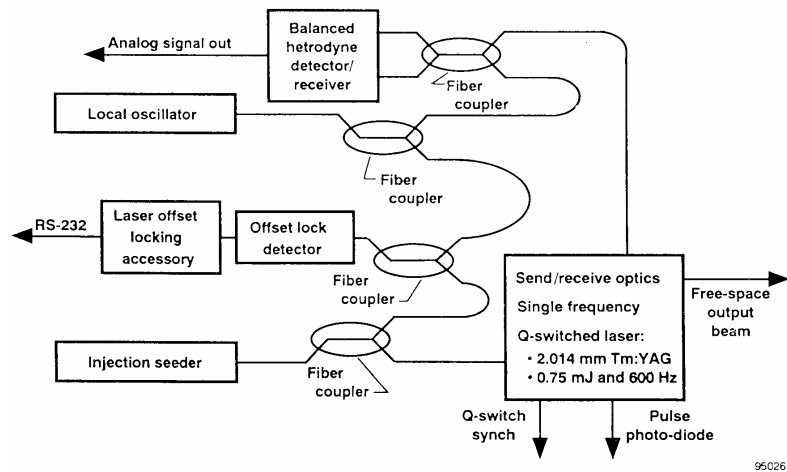
Sextant Avionique i Frankrike har utvecklat ALEV-3 [44], som är ett CW CO₂-system som mäter i tre riktningar, se figur 10.



Figur 10. ALEV-3. Mät riktningar indikerade till vänster och jämförelse med referensfart till höger.

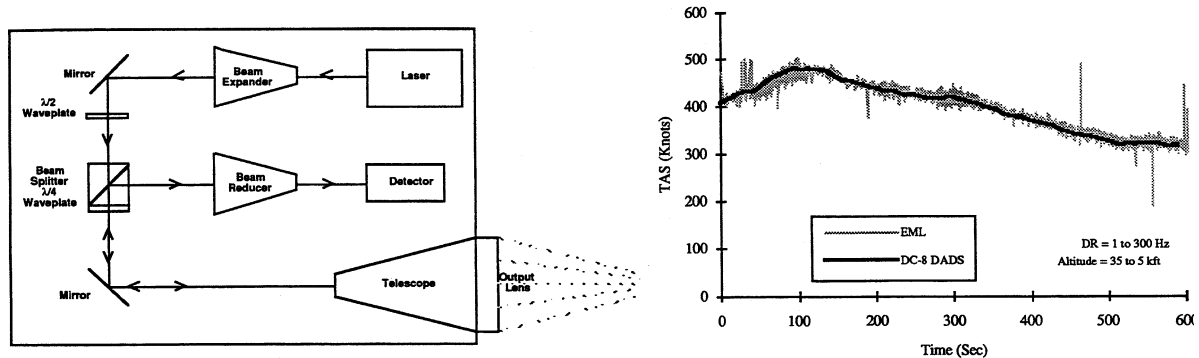
ALEV-1, som var föregångaren till ALEV-3, var ett enriktningssystem och det första laserbaserade systemet som mätte fart i överljud. ALEV-systemen har flugits i stor omfattning, bl.a. nämns 1200 timmar i Airbus flygplan [45, 46] där det användes som kalibreringssystem. ALEV har även flugits i Puma helikopter samt i Caravelle transportflygplan och Mirage jaktplan. Uppgiften noggrannhet och prestanda är mycket bra; mätområde 10-800 knop, noggrannhet $< 0,5$ knop (3σ) och känslighet $\beta_\pi < 5 \cdot 10^{-11} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ [44].

Det första pulshade systemet som använts för fartmätning för flygplan utvecklades av Honeywell och Lightwave [47, 48], se figur 11. Honeywell/Lightwave-systemet är ett enriktningssystem som flögs i en DC-8 [49]. Samtidigt flögs ett "sheet-pair" system samt ett "EML"-system, se nedan. Honeywell/Lightwave fann god överensstämmelse mellan mätningar med pitotrör och mätningarna med det pulshade systemet. Med på flygplanet fanns även en partikelstorleksmätare som gav resultat i god överensstämmelse med laserradarn.



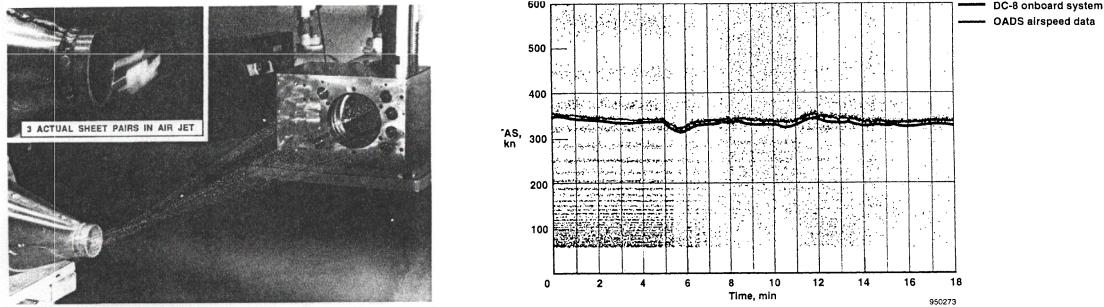
Figur 11. Blockschemat på det pulshade Honeywell/Lightwave-systemet.

Boeing har utvecklat ett EML-system baserat på en CW Nd:YAG-laser och flugit det i en DC-8 [49], se . Man fann relativt god överensstämmelse mellan EML-systemets fartmätning och fartmätningar med pitotrör. EML-systemet var ett enriktningssystem.



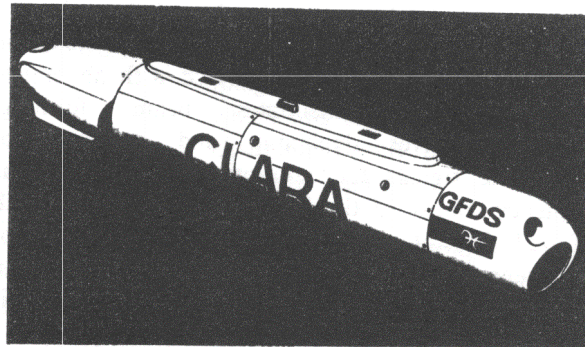
Figur 12. Strålgången i ett EML-system och exempel på mätningar.

Ett SP-system från Titan-Spectron flygtestades samtidigt med Honeywell/Lightwaves pulshade 2 μ m-system och EML-systemet från Boeing på en DC-8 [1]. Överlag fann Titan-Spectron relativt god överensstämmelse med flygplanets ordinarie fartmätning. Dock var antalet felaktiga mätningar stort, se figur 13.



Figur 13. SP-system av Titan-Spectron. Exempel på mätningar. Små prickar representerar mätningar.

Ett pulsat CO₂-system är det brittiska/franska samarbetsprojektet CLARA (coherent laser airborne radar), se figur 14. CLARA är ett koherent laserradarsystem som ska fullgöra många uppgifter, t.ex. terrängföljning, vibrometri och hinderindikering [50]. Dessutom ska CLARA fungera som ett optiskt luftdatasystem. Motiven för att välja CO₂-laserteknik är bättre prestanda i dimma för hårdmålmätningar (avståndsmätning, vibrometri mm) samt möjligheter till höga pulsrepetitionsfrekvenser (PRF).



Figur 14. Kapsel med CLARA-systemet.

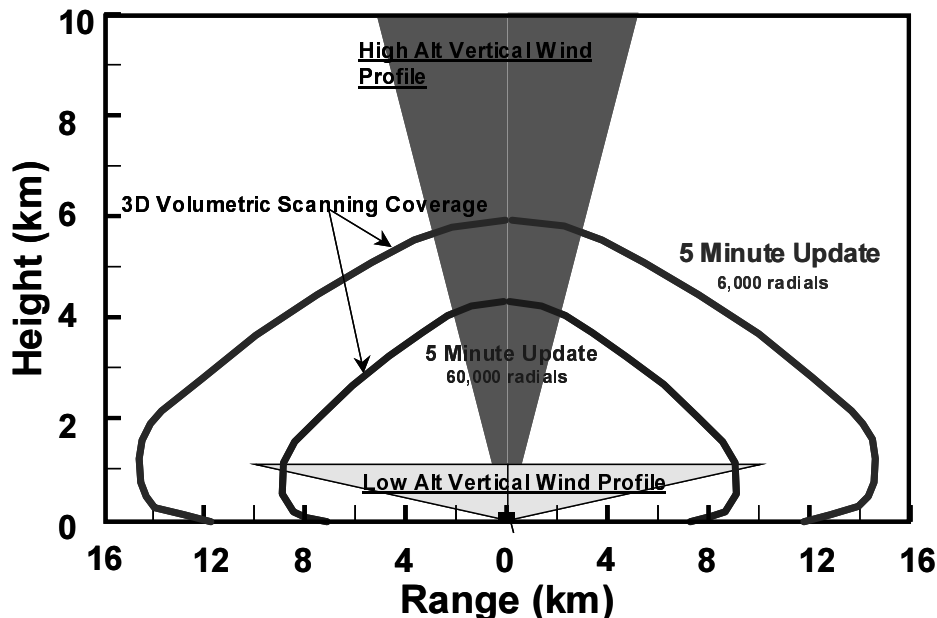
6.2 Företag som tillverkar lasersystem för vindmätning

Såvitt känt är Coherent Technologies, Inc. det enda företag som idag säljer laservindmätare kommersiellt. De system som man erbjuder är generellt sett mycket kraftfulla, med lång räckvidd (upp till 14 km horisontellt och omkring 6-10 km vertikalt) och även i övrigt imponerande prestanda. I många tillämpningar är det dock onödigt med sådana prestanda. Några andra tillverkare annonserar om att man har laservindmätare på produktprogrammet, men det är osäkert huruvida dessa produkter är kommersiellt tillgängliga.

6.2.1 Coherent Technologies Inc.

Även om Honeywell och Lightwave var först med fartmätning (*true airspeed*) med ett pulsat 2 μ m-system ska nämnas att Coherent Technologies Inc. (CTI), USA är dominerande när det gäller vindmätning med 2 μ m pulsat system [51]. De har utvecklat både markbaserade system för t.ex. vindmätning vid flygplatser och flygplansbaserade system för vindmätning vid lastfällning från flygplan och för sikteskorrektion hos vapen.

CTI grundades 1984 och beskriver sig själva som världsledande inom laserradarområdet. Den kommersiella divisionen CLR Photonics, Inc.¹ bildades 1992. Företaget har haft ett stor antal utvecklingskontrakt för det amerikanska försvaret. En av de produkter som marknadsförs kommersiellt är WindTracer, vilket är ett mycket kapabelt vindmätningssystem. Det är pulsat och med räckvidder ut till 14 km (horisontellt), se figur 15 och specifikationen i tabell 7. Bland de tillämpningar som man har sålt system till kan nämnas övervakning av flygplatser: vindskjuvning, luftvirvlar, vertikal vindprofilering. Amerikanska försvaret har också anskaffat ett antal system för fjärrdetektion av BC-stridsmedel.



Figur 15. Räckviddskurvor för WindTracer.

Tabell 7. Specifikation för WindTracer med sändar-/mottagarenheten MAG-1, (från Coherent Technologies, Inc./CLR Photonics, Inc).

Parameter	Värde
Våglängd	2022,5 nm
Pulsrepetitionsfrekvens	500 Hz
Pulsenergi	2,5 mJ
Pulslängd	350 ± 50 ns @ 500 Hz
Temperaturområde	0°C – +40°C
Storlek och vikt:	
Sändare/mottagare	29 × 32 × 476 cm ³ (b × h × l); 16 kg
Elektronik	20 × 23 × 28 cm ³ ; 18 kg
Värmeväxlare	482 × 178 × 432 cm ³ ; 16 kg
Räckvidd	7-14 km horisontellt 4-10 km vertikalt
Hastighetsnoggrannhet	0,6 m/s vid maximalt avstånd 0,1-0,5 m/s för kortare avstånd
Avståndsupplösning	50-100 m

6.2.2 OADS

Optical Air Data Systems (OADS)² grundades 1990 och utvecklar fiberoptiska lasersensorer för mätning av vindhastighet, avståndsmätning och olika multifunktionssensorer. Företaget

¹ 655 Aspen Ridge Drive, Lafayette, Co 80026 USA. Internet: www.ctilidar.com

² 10531 Terminal Road, Manassas, VA 20110, USA. Internet: www.oads.com

har omkring 5 anställda. Grundaren har en bakgrund från Lockheed, där han arbetade med forskning kring laserbaserade vindmätningssystem. Han har också ett antal patent på området [52-56].

Vid ett besök vid OADS i maj 2002 demonstrerades en laservindmätare baserad på fiber-optisk teknik och för övrigt mycket likt ett system som tidigare utvecklats vid FOI [11]. I försökssystemet som visades ingick en fiberlaser och en egenutvecklad Erbium-fiberförstärkare. Designmålet var en räckvidd på ca 50 m. Dock hade man stora problem med lågt SNR, förmodligen beroende på högt systembrus. Man sade sig ha ett uppdrag från US Navy för att demonstrera ett optiskt luftdatasystem för helikoptrar. En bedömning är dock att företaget ännu inte har någon kommersiell produkt för vindmätning.

6.2.3 Michigan Aerospace Corporation

Michigan Aerospace Corporation (MAC)¹ bildades 1996 för att kommersialisera teknologi som utvecklats vid University of Michigan, Space Physics Research Laboratory (SPRL). Man har specialiserat sig på lidarteknik baserat på Fabry-Perot-interferometrar.

Bland tillämpningarna som man arbetar med kan nämnas optiska luftdatasystem som utnyttjar molekylär bakåtspridning (Rayleigh-spridning) istället för aerosolspridning (Mie-spridning). Tekniken förutsätter användning av UV-lasrar och är användbar då aerosolkoncentrationen är mycket låg, t.ex. på höga flyghöjder, vilket gör att bakåtspridningen från aerosoler är otillräcklig.

6.2.4 EOO, Inc.

EOO, Inc.² bildades ur GTE Government Systems' Electro-Optics Organization i början på 1990-talet. Företaget hade då en beställning från US Army och NASA (SBIR, fas 1) att utveckla en laservindmätare. Tillämpningen var vindprofilering vid flygplatser, och räckvidden skulle vara ut till 2 km, se tabell 8. Trots en lyckad funktionsdemonstration fick man inte någon beställning på fas 2 och arbetet lades ned. Den teknik man baserade sitt system på var teknik som Michigan Aerospace tillämpar, med en Fabry-Perot-interferometer, samt pseudo-slumpmässig pulskodning, vilket möjliggör avståndsupplöst vindmätning.

Tabell 8. Kravspecifikation för laservindmätare från EOO.

Parameter	Värde
Hastighetsnoggrannhet	1 m/s
Mätområde	± 50 m/s
Räckvidd	2 km
Mättid	< 1 s (per mätriktning)
Vikt	"manburen"
Volym	85 l

6.2.5 Hovemere Ltd.

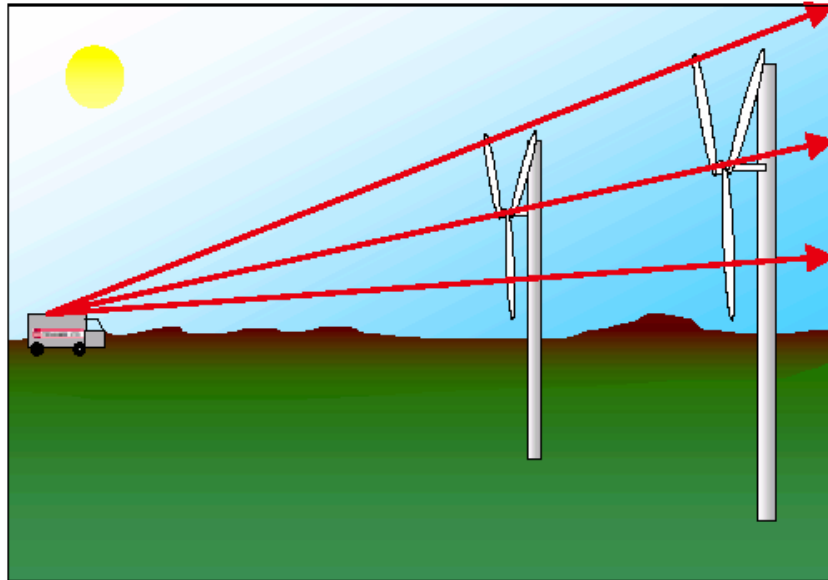
Hovemere Ltd.³ som har varit i branschen i ca 25 år men tidigare mest vänt sig mot universitetsvärlden, inriktar sig nu också mot den kommersiella marknaden. Man har bl.a. tagit fram ett laserbaserat vindmätningssystem som kallas Mobile Doppler Wind Lidar (MDWL), ursprungligen utvecklat på uppdrag av ESA för atmosfärsstudier. I nuvarande utförande är systemet monterat i en liten lastbil och har en vikt på ca 300 kg, se figur 16.

¹ 1777 Highland Dr, Suite B, Ann Arbor, MI 48108, USA. Internet: www.michiganaero.com

² 269 N. Mathilda Drive, Sunnyvale, CA 94086, USA. Internet: www.eooinc.com

³ 56 Hayes Street, Hayes, Bromley, Kent, UK BR2 7LD. Internet: www.hovemere.com

Systemets vikt är huvudsakligen avhängigt av storlek på teleskop och typ av laser. I den tillämpning som man för närvarande riktar in sig mot (vindmätning för vindkraftverk) används våglängden 355 nm. Systemets räckvidd anges vara ~50 m – 20 km och mät noggrannheten uppges vara <1 m/s vid en mättid på 10 s.



Figur 16. Ett laservindmätssystem (MDWL) kan användas bl.a. för att studera nya platser för vindkraftverk.

6.2.6 Ophir Corporation

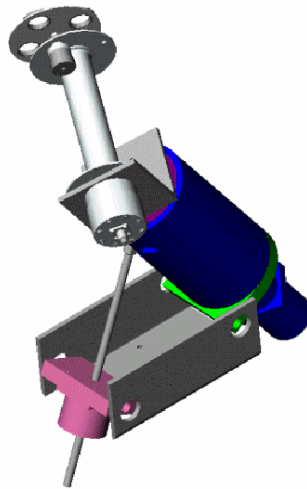
Ophir Corporation¹ har tidigare utvecklat ett markbaserat laservindmätningssystem baserat på en kombination av Rayleighspridning och Miespridning (molekyl- respektive aerosolspridning). Tillämpningen var att mäta lokal vind längs glidbanan vid flygplatser (för detektion av vindskjuvning och turbulens). Uppdragsgivare var NASA. Systemet utnyttjade en halvledarlaser som källa och utformades för att vara billigt. Numera inriktar man sig mot optiska luftdatasystem för moderna flygplan, ett arbete som utförs på uppdrag av NASA och US Navy. På grund av pågående patentärenden kan man inte ge några detaljer om den teknologi man använder och den är därför inte heller kommersiellt tillgänglig.

6.2.7 Yankee Environmental Systems, Inc.

Yankee Environmental Systems, Inc.² (YES) tillverkar olika typer av instrument för mätning av meteorologiska parametrar. Företagets så kallade Total Doppler Lidar TDL-6200 mäter vindhastighet och vindriktning. I systemet ingår en halvledarlaser vid 1,5 μm och en erbiumdopad fiberförstärkare. Konceptet förefaller vara likt det som tidigare utvecklats vid FOI [11] och som även används vid OADS. Måthuvudet skannas i ett koniskt avsökningsmönster för att möjliggöra härledning av u-, v- och w-komponenterna i vindvektorn. Det är ett pulsat system och mottagna pulser medelvärdesbildas för att härleda dopplerskiftet. De tillämpningar man anger är bl.a. militära taktiska vädersystem och olika flygtillämpningar. Systemet är i dagsläget ännu ej kommersiellt tillgängligt, men man räknar med att komma ut på marknaden inom några månader.

¹ 10184 West Belleview Avenue, Suite 200, Littleton, CO 80127-1762, USA. Internet: www.ophir.com

² Airport Industrial Park, 101 Industrial Blvd., Turners Falls, MA 01376, USA. Internet: www.yesinc.com



Figur 17. Dopplerlidar TDL-6200 med skanner från Yankee Environmental Systems, Inc.

6.2.8 Kayser-Threde GmbH

Det tyska företaget Kayser-Threde GmbH¹ var i mitten på 1990-talet engagerade i forskning och utveckling av laserbaserade vindmätningssystem. Det är dock inte bekant hur verksamheten ser ut i dag.

6.2.9 THALES Avionics

Sextant Avionique (numera THALES Avionics) har tidigare varit engagerade i utveckling av laser-doppler-system (ALEV [44] samt WAKENET [57] och EU-projektet I-WAKE). Dock känner vi inte till hur verksamheten ser ut idag, eller huruvida något system för laservindmätning är kommersiellt tillgängligt.

6.3 Konventionella vindmätare

Konventionella vindmätare mäter vindförhållandena i en punkt där sensorn är placerad. En standardmodell av vindmätare är exempelvis Vaisalas WAA151 Anemometer. Den har tre koniska koppar på en roterande axel och har ett mätområde på 0,4–75 m/s med en noggrannhet på (som bäst) $\pm 0,17$ m/s (en standardavvikelse och med utnyttjande av den karaktäristiska överföringsfunktionen).

Ultraljudsanemometrar mäter horisontell vindhastighet och riktning. Mätprincipen baseras på mätning av gångtiden, den tid det tar för ultraljudet att färdas från en mätgivare till en annan, beroende på vindhastigheten längs vägen. Gångtiden mäts i bägge riktningar. När vindhastigheten är noll är gångtiden lika för fram- och återgående ultraljud. Då vinden blåser längs mätsträckan ökar gångtiden mot vinden samtidigt som den minskar i riktningen med vinden. Därigenom kan vindhastigheten längs mätsträckan beräknas. Genom att utnyttja tre mätsträckor, inbördes vridna 120° i förhållande till varandra, kan också vindriktningen bestämmas. Vaisalas modell WAS425 har ett mätområde på 0–65 m/s och en noggrannhet i vindhastighet på $\pm 0,135$ m/s och $\pm 2^\circ$ i vindriktning.

¹ Wolfrathhauser Strasse 48, 81379 München, Tyskland. Internet: www.kayser-threde.de

7 Diskussion

För kortare mätavstånd, säg ut till ett 100-tal m, bör ett CW-system kunna uppfylla prestandakraven. Enkelhet och kompaktitet får man då ”på köpet”. För de mera krävande tillämpningarna med horisontella räckviddskrav på 10-35 km krävs ett pulsat system. En räckvidd på 15 km är dock rimlig, det har redan demonstrerats av CTI med WindTracer-systemet. Vid sådana mätavstånd är det också intressant att få en avståndsupplöst mätning, vilket enkelt erhålles med ett pulsat system. Ett pulsat system blir mer komplicerat och även större och tyngre än ett CW-system. En fråga man bör ställa sig är om det är nödvändigt att mäta vindfältet längs hela projektilbanan ut till 35 km, eller om det är tillräckligt att mäta endast ut till några km.

Dimensionerna på ett laservindmätningssystem är naturligtvis avhängigt av vilka prestanda som krävs av systemet. För mätavstånd ut till ca 50 m är en storlek på $15 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ en möjlig dimension; med en vikt på omkring 1 kg. För mer kapabla system kan en storlek på upp till $50 \times 50 \times 70 \text{ cm}^3$ och en vikt på upp till 50 kg vara rimlig. Kostnadsdrivande prestanda är framförallt räckvidden (mätavståndet) för systemet. Denna parameter styr dels valet av kontinuerligt eller pulsat system, samt krav på lasereffekt/-energi.

7.1 Multifunktion

Ett lasersensorsystem skulle på en given plattform kunna ha många potentiella funktioner. En realisering av dessa funktioner ger lasersystem med varierande komplexitet, beroende på vilka och hur många funktioner som skall lösas. Speciellt är naturligtvis multifunktionsaspekten intressant; dvs. att i samma lasersystem implementera flera funktioner. Detta skulle ge vinster i vikt, volym och kostnad, jämfört med att implementera funktionerna i separata system. Naturligtvis ökas komplexiteten för varje funktion som läggs till, och den ökade kostnaden får i varje kombination vägas mot det mervärde som erhålls.

Några exempel på flera funktioner som kan kombineras ihop i ett multifunktionssystem ges nedan.

- Bredbandslänk för stridsledningstrafik (Ljud och bildfiler, målöverföring, textmeddelanden, radar-/sonaröverföring). Låter sig väl kombineras med ett vindmätningssystem. Det som krävs är en möjlighet att modulera utsänd lasereffekt så att tillräcklig bandbredd kan erhållas.
- Korthållslänk för bryggtrafik. Liksom bredbandslänken låter denna kombination sig väl göras. Kraven avseende lasereffekt och bandbredd blir dock mindre än för bredbandslänken.
- Undervattenslänk (kommunikation). För bästa transmission under vatten utnyttjas lämpligen en grön eller blågrön laser, något som förmodligen inte är kompatibelt med krav på ögonsäkerhet för vindmätningssystemet.
- Identifiera och mäta in andra optroniska sikten. Låter sig göras. Ställer möjligen ökade krav på signalbehandlingen, beroende på hur avancerad identifieringen skall vara.
- Målinmätning. Medför krav på noggrann vinkelavläsning och exempelvis en kvadrantdetektor.
- Banföljning av projektiler. Medför krav på noggrann vinkelavläsning och exempelvis en kvadrantdetektor. Snabbare uppdateringskrav än för målinmätning.
- mätning av projektilhastighet vid utskjutning, $v_0 > 100 \text{ m/s}$. Kan kombineras med vindmätning. Ställer dock väsentligt högre krav på mottagarbandbredd, eftersom det blir frågan om betydligt större Dopplerskift än vad som är normalt vid vindmätning. Detta kan bli ett kostnadsdrivande krav.

- ”Taktiskt väder”. I en duellsituation beror utfallet bl.a. på balansen mellan sensorer och signaturanpassning. Det är nödvändigt med kunskap såväl om den egna sensoruppsättningens räckvidd och egen signatur som om hotsensorer och signaturen för ett hotobjekt. Systemprestanda (t.ex. räckvidd) för optiska system beror till stor del på det medium som ligger mellan sensor och objekt (atmosfär, rök, dimma och liknande). Parametrar som är av betydelse och som bör ingå i en prognosmodell är bl.a. temperatur, fuktighet, sikt, strukturkonstanten för refraktiv turbulens (C_n^2) samt vindhastighet och -riktning. Uppgifter om atmosfärens brytningsindex på olika höjder kan också utnyttjas för prediktion av radarvågutbredning (åtminstone vid klart väder och vid låga ledskikt). Kunskap om atmosfären är nödvändig i en rad tillämpningar, exempelvis:
 - Hotanalys
 - Taktiskt uppträdande
 - Systemprestanda för VMS:
 - Signaturprognos
 - Sensorprognos; att bestämma räckvidden hos ett (eget eller fientligt) E/O-system, t.ex. ett spanings- eller siktessystem som använder IR-våglängder, nära havsytan. Om räckvidden för en hotsensor kan bedömas (”På vilket avstånd kan jag upptäckas av en hotsensor?”) ges möjlighet att välja rätt taktiskt uppträdande i en strids-situation.
- Antisensorlaser. För att fungera som ett antisensorlasersystem krävs att ”intressanta” laservåglängder finns tillgängliga, samt att tillräckligt hög pulsenergi kan genereras. Detta medför en ökning i storlek, vikt och kostnad.
- BC-indikering. Är en lämplig kombination. För att detektera och beräkna utbredningen av moln som kan innehålla biologiska och/eller kemiska stridsmedel behövs en snabb överblick över vädersituationen där vindhastighet, vindriktning, förekomst av moln/aerosoler är nyckelparametrar. Traditionellt uppmättes dessa parametrar genom insamling av data från väderstationer. Med modern laserteknik kan man lokalt mäta upp och mappa dessa parametrar i en 3D-volym. (CTI har demonstrerat denna funktion med sitt WindTracer-system).

7.2 Systemlösningar för olika tillämpningar

I olika tillämpningar kan olika systemlösningar väljas, beroende på vilka krav som ställs på räckvidd, huruvida avståndsupplöst mätning krävs eller inte, osv. För att välja en adekvat systemlösning för en given tillämpning bör en fördjupad studie ur ett tillämpningsperspektiv göras. Frågor som behöver belysas ytterligare är t.ex. vilket mätavstånd som är nödvändigt för att lösa en viss uppgift.

Beträffande vindmätning för vapenkorrektur bör man ytterligare studera hur stor förbättringen i träffsannolikhet blir med tillgång till data om vindfältet på nära håll jämfört med tillgång till vinddata längs hela projektilbanan. Eftersom en liten avvikelse på grund av vindpåverkan i början på projektilbanan ger en stor avvikelse på målet medan inverkan av vind nära målet, då projektilen har lägre hastighet och är mer känslig för vindavdrift, kanske inte ger så stort bidrag till projektilens träffpunkt i målet. Sålunda kan användbarheten av korrekta vinddata från tämligen korta avstånd (vilket kan erhållas med enklare vindmätningssystem) vara relativt stor i förhållande till kostnaden jämfört med nyttan med och kostnaden för vinddata från långa avstånd längs hela projektilbanan. Den senare lösningen kräver ju ett mer högpresterande och därmed dyrare vindmätningssystem.

I systemkraven (se tabell 1) anges krav på räckvidder mellan 10-35 km horisontellt och 1-20 km vertikalt för vapentillämpningar. De längsta räckvidderna i dessa intervall kräver avancerade vindmätningssystem. Det idag (enda?) kommersiellt tillgängliga systemet

(WindTracer) klarar enligt standardspecifikationen 14 km horisontellt och 10 km vertikalt. Det bedöms dock som möjligt att realisera ett system som uppfyller även de hårdaste kraven. Kraven på mätnoggrannhet i vindhastighet (0,5 m/s) och vindriktning (5°) samt avstånds- (höjd-)upplösning (50 m) bedöms som relativt enkla att uppfylla.

Eftersom både vindhastighet och vindriktning varierar över tiden beror på en mängd faktorer är det inte givet att den momentana vindhastigheten och –riktningen är den i alla lägen bästa informationen. Kanske är det ofta bättre att få ett medelvärde över en viss tid och mätsträcka, samt uppgifter om variation samt största och minsta värde i ett tidsintervall. Behovet i olika tillämpningar behöver utredas ytterligare för att kunna utforma signalbehandling och presentation på ett bra sätt.

Vi kan se tre klasser av system enligt tabell 9. De föreslagna tillämpningarna är en första ansats att kvantifiera prestandakraven (huvudsakligen räckvidden) för olika tillämpningar. Enligt vad som sagts ovan kan denna indelning behöva revideras.

Tabell 9. Några karaktäristika för tänkbara klasser av laservindmätningssystem.

Klass	Mätavstånd	Plattform	Typ av lasersystem	Exempel på tillämpningar	Anmärkning
Klass 1	~ 50 m	Kan göras handhållen	CW-teknik	mätning av vind i närområdet, motmedelsinsatser för stridsfordon, enkel vindmätare för fartyg för sjösäkerhet och navigering, vindmätning för helikopterlandning, prickskytt(?)*	Enkel, lätt (~0,5 kg) och billig ingen (måttlig) avståndsupplösning
Klass 2	~ 1 km	Plattformsburet (möjligen manburet)	Pulsat (eventuellt CW, om små krav på avståndsupplösning)	pv-vapen, motmedelsinsatser för fartyg, landningshjälpmedel vid flygbaser, minska utskjutningsstörningar av robotar, (BC-indikering)	
Klass 3	~ 5–10 km	Plattformsburet	Pulsat	vapenkorrektur för långräckviddig eld, underlag för meteorologiska prognoser, (BC-indikering)	Avancerat system 50-100 kg(?)

* Möjligen kräver tillämpningen för prickskytt en längre räckvidd. I exempelvis ett scenario där skytten ligger dold i ett skogsbryn och skall skjuta ut över öppen terräng, borde dock vinddata från ca 50 m i det öppna terrängavsnittet vara av stort värde för framgångsrik bekämpning. I urban miljö, där svåra vindförhållanden kan uppträda kring höga byggnader, torde kravet på räckvidd vara större, kanske 1-2 km.

8 Förslag till fortsatt verksamhet

I en fortsatt verksamhet bör någon intressant tillämpning för en laservindmätare väljas ut för att studeras ytterligare. Ett försökssystem bör realiseras för att användas till utvärdering av tekniken. Utvecklingen kan gärna ske i samverkan mellan FOI och svensk industri. För att skaffa praktiska erfarenheter av laserbaserad vindmätning kan det vara lämpligt att fokusera på ett enklare system för kortare mätavstånd (~50 m eller ~1 km). Ett försökssystem bör kunna realiseras inom tre år från projektets start. Systemet utvecklas och provas i huvudsak i laboriemiljö och i enklare fältförsök. Det färdiga systemet provas på fordon och fartyg. Erfarenheterna från ett sådant projekt kan sedan utnyttjas för att gå vidare med mer kapabla system för längre räckvidder (5-10 km).

Målsättningen med projektet skall dels vara att realisera ett tekniskt system som kan mäta vindriktning och -styrka (möjligen också förekomsten av aerosoler och moln) och dels att verifiera ett systemkoncept. Möjligheterna till multifunktionslösningar kan studeras mer i detalj. Den övergripande målsättningen bör vara att:

- utveckla laserteknik och detektionssystem för en koherent laserradar avsedd för vindmätning.
- använda systemet i applikationstester och demonstrera funktion och prestanda i tillämpningar såsom vindmätning, möjligen också BC-detektion eller andra funktioner.

Resultatet av funktionsdemonstrationen tillsammans med de tekniska erfarenheter som uppnås kommer att ligga till grund för en värdering av systemkonceptet. De teknikområden som behöver utvecklas omfattar bl.a. laserteknik vid den ögonsäkra våglängden 1,5 μm och med koherent detektion. Signalbehandlingen inkluderar snabb A/D-omvandling och digital signalbehandling.

För att säkerställa att målet nås och samtidigt ge möjligheter för omplanering föreslås en etappindelning i 4 steg:

Etapp 1

Definition av systemprestanda. Design och specifikation av försökssystem. Kostnadsanalys och riskbedömning.

Mål: Underlag för anskaffning av delkomponenter och sammansättning av system.

Tidsåtgång: 6 mån

Etapp 2

Utveckling och anskaffning av delkomponenter. Utveckling av datainsamlingssystem.

Mål: Datainsamlingssystem.

Tidsåtgång: 12 mån

Etapp 3

Utveckling och sammansättning av mät huvud. Systemintegration och –prov samt funktionsdemonstration.

Mål: Färdigt försökssystem.

Tidsåtgång: 12 mån

Etapp 4

Fältprov och demonstrationer. Systemutvärdering.

Mål: Slutdemonstration.

Tidsåtgång: 6 mån

9 Slutsatser

Möjligheten att kunna göra en dynamisk atmosfärsanalys i realtid ökar förmågan att verka med precisionsvapensystem, då man får tillgång till detaljerade och aktuella data om vädersituationen, speciellt vinddata. Exempelvis vindmätning strax före utskjutning av granater från olika system med indirekt och direkt eld. Vidare ökar förmågan att göra aktuella och bra väderprognoser, inte minst vid NBC-händelser. Utvecklingen av teknik och kompetens inom området laserbaserad vindmätning har även tillämpningar inom flygsäkerhet (t.ex. detektion av luftvirvlar, vindskjuvning, turbulens) samt inom meteorologi och miljövård.

Ett lasersensorsystem skulle på en given plattform kunna ha många potentiella funktioner. En realisering av dessa funktioner ger lasersystem med varierande komplexitet, beroende på vilka och hur många funktioner som skall lösas. Ett multifunktionssystem skulle kunna ge vinster i vikt, volym och kostnad, jämfört med att implementera funktionerna i separata system. Naturligtvis ökas komplexiteten för varje funktion som läggs till, och den ökade kostnaden får i varje kombination vägas mot det mervärde som erhålls. Tänkbara funktioner kan vara vindmätning, mätning av projektilhastighet (v_0), kommunikation, siktmätning och BC-indikering.

Både vindhastighet och vindriktning varierar på ett relativt komplext sätt beroende på en mängd faktorer, bl.a. gränsskiktets höjd och omgivande terräng. Det är inte givet att den momentana vindhastigheten och -riktningen är den i alla lägen bästa informationen. Kanske är det bättre att få ett medelvärde över en viss tid samt uppgifter om variation samt största och minsta värde i ett tidsintervall. För att utforma signalbehandling och presentation behöver behovet i olika tillämpningar utredas ytterligare. I det fortsatta arbetet bör ingå att även studera förekommande vindförhållanden i olika mätsituationer, för att på ett korrekt sätt kunna dimensionera ett vindmätningssystem.

I systemkraven anges krav på räckvidder upp till 35 km horisontellt och 20 km vertikalt för vapentillämpningar, vilket kräver avancerade vindmätningssystem. Det idag (enda?) kommersiellt tillgängliga systemet (WindTracer) klarar enligt standardspecifikationen 14 km horisontellt och 10 km vertikalt. Det bedöms dock som möjligt att realisera en laservindmätare som uppfyller även de hårdaste kraven. Dock bör ytterligare studeras hur stor förbättringen i träffsannolikhet blir med tillgång till data om vindfältet på nära håll jämfört med tillgång till vinddata längs hela projektilbanan. Användbarheten av korrekta vinddata från tämligen korta avstånd (vilket kan erhållas med enklare vindmätningssystem) kan vara relativt stor i förhållande till kostnaden jämfört med nyttan med och kostnaden för vinddata från långa avstånd längs hela projektilbanan. Den senare lösningen kräver ju ett mer högpresterande och därmed dyrare vindmätningssystem.

Vi kan urskilja tre klasser av system för olika tillämpningar och med olika prestanda. Klass 1 är ett enkelt, lätt (handhållet) och billigt system för mätavstånd ~ 50 m. Det kan realiseras med CW-teknik. Klass 2 är ett mer avancerat pulsat (eller möjligen CW) system för mätavstånd ~ 1 km. Det placeras på en plattform eller är möjligen manburet. Slutligen klass 3, som är ett avancerat pulsat och plattformsburet system för mätavstånd ~ 5 -10 km.

Även om ett flertal laserbaserade vindmätningssystem har utvecklats vid många institutioner och företag världen över, har dessa system främst varit ägnade åt forskningsändamål, samt som demonstratorer. På marknaden finns idag endast ett fåtal kommersiella leverantörer. I denna studie föreslår vi att ett nationellt försökssystem realiseras för att användas till utvärdering av tekniken. För att skaffa praktiska erfarenheter av laserbaserad vindmätning kan det vara lämpligt att fokusera på ett enklare system för kortare mätavstånd (~ 1 km). Erfarenheterna från ett sådant projekt kan sedan utnyttjas för att gå vidare med mer kapabla system för längre räckvidder (5-10 km).

10 Förkortningar

AKF	autokorrelationsfunktion
CLR	<i>coherent laser radar</i> (koherent laserradar)
CRLB	<i>Cramer-Rao lower bound</i>
CW	<i>continuous wave</i> (kontinuerlig laser – ej pulsad)
EML	<i>enhanced mode lidar</i>
FWHM	<i>full width at half maximum</i>
IFM	<i>instantaneous frequency measurement</i>
LDA	<i>laser Doppler anemometry</i>
Lidar	<i>light detection and ranging</i> (i detta sammanhang synonymt med laserradar)
LO	lokaloscillator
ML	<i>maximum likelihood</i>
MLA	<i>multi-lag autocovariance</i> (även kallad PPP)
MOADS	<i>molecular optical air data system</i>
OADS	<i>optical air data system</i>
PDF	<i>probability density function</i> (täthetsfunktion)
PG	periodogram
PP	puls-par (även kallad SLA)
PPP	poly-puls-par (även kallad MLA)
SAW	<i>surface acoustic wave</i>
SLA	<i>single lag autocovariance</i> (även kallad PP)
SNR	<i>signal-to-noise ratio</i> (signal/brusförhållande)
SP	<i>sheet pair</i>

11 Referenser

- 1 G. W. Kamerman, "Laser radar" in *The Infrared & Electro-Optical Systems handbook*, vol 6, Editor: C. S. Fox, Infrared information analysis center and SPIE optical engineering press, 1993.
- 2 J. M. Vaughan, K. O. Steinvall, C. Werner and P. H. Flamant, "Coherent laser radar in Europe", Proc. IEEE, vol. 84, sid. 205-226, 1996.
- 3 R. M. Huffaker and R.M. Hardesty, "Remote sensing of atmospheric wind velocities using solid-state and CO2 coherent laser systems", Proc. IEEE, vol. 84, sid. 181-204, 1996.
- 4 R. T. Menzies and R. M. Hardesty, "Coherent Doppler lidar for measurements of wind fields", Proc. IEEE, vol. 77, sid. 449-462, 1989.
- 5 R. G. Frehlich och M. J. Kavaya, "Coherent laser radar performance for general atmospheric refractive turbulence", Appl. Opt., vol. 30, 5325-5352, 1991.
- 6 M. Harris, G. Constant, and Carol Ward, "Continuous-wave bistatic laser Doppler wind sensor", Appl. Opt. Vol. 40, No. 9, sid. 1501-1506, 2001.
- 7 A. J. Hughes och E. R. Pike, "Remote measurements of wind speed by laser Doppler systems", Appl. Opt., vol. 12, sid. 597-601, 1973.
- 8 R. G. Frehlich och M. J. Yadlowsky, "Performance of mean-frequency estimators for Doppler radar and lidar", J. Atm. and Oceanic Tech., vol. 11, sid. 1217-1230, 1994.
- 9 R. L. McGann, "Flight test results from a low-power Doppler optical air data sensor", SPIE vol. 2464, sid. 116-124, 1995.
- 10 L. L. Erwin, R. L. McGann, D. C. Soreide and D. J. Morris, "Enhanced mode lidar for airborne airspeed measurement", sid. 23-26, Proc. 7th conf. on coherent laser radar, 1993.
- 11 C. Karlsson, F. Olsson, D. Letalick och M. Harris, "All fiber multifunction continuous-wave coherent laser radar at 1.55 μm for range, speed, vibrometry and wind measurements", Appl. Opt., Vol. 39, No. 21, s. 3716-3726, 2000.
- 12 M. Harris, G. N. Pearson, K. D. Ridley, C. J. Karlsson, F. Å. A. Olsson, and D. Letalick, "Single-particle laser Doppler anemometry at 1.55 μm ", Appl. Opt. Vol. 40, No. 6, sid. 969-973, 2001.
- 13 A. E. Smart, "Optical velocity sensor for air data applications", Opt. Eng., vol. 31, sid. 166-173, 1992.
- 14 J. B. Abbiss, P. D. Kenefick and A. E. Smart, "Design and testing of an airborne coherent Doppler anemometer", sid. 27-30, Proc. 7th conf. on coherent laser radar, 1993.
- 15 C. L. Korb, B. Gentry, and C. Weng, "The edge technique – Theory and applications to the lidar measurements of atmospheric winds", Appl. Opt., Vol. 31, sid. 4202-4213, 1992.
- 16 C. L. Korb, B. Gentry, S. X. Li and C. Flesia, "Recent advances in Lidar wind measurements with the edge technique", Proc. 9th Conference on Coherent Laser Radar, sid. 32-35, Linköping 23-27 juni 1997.
- 17 M. J. McGill och J. D. Spinhirne, "Comparison of two direct-detection Doppler lidar techniques", Opt. Eng., vol 37, sid. 2675-2686, 1998.

- 18 C. Karlsson, P. Ågren och D. Letalick, "A survey of receivers and signal analysis for an FMCW semiconductor laser radar", FOA-R--98-00723-408--SE, February 1998.
- 19 J. Rothermel, D. M. Chambers, M. A. Jarzembski, V. Srivastava, D. A. Bowdle och W. D. Jones, "Signal processing and calibration of continuous-wave focused CO₂ Doppler lidars for atmospheric backscatter measurements", *Appl. Opt.*, vol. 35, sid. 2083-2095, 1996.
- 20 V. A. Banakh, I. N. Smalikho, F. Köpp och C. Werner, "Representativeness of wind measurements with a cw Doppler lidar in the atmospheric boundary layer", *Appl. Opt.*, vol. 34, sid. 2055-2067, 1995.
- 21 M. I. Skolnik, *Introduction to radar systems*, McGraw-Hill, 1981.
- 22 J. Tsui, *Digital techniques for wideband receivers*, Artech House Inc., 1995.
- 23 S. W. Henderson, P. M. Suni, C. P. Hayle, S. M. Hannon, J. R. Magee, D. L. Burns och E. H. Yuen, "Coherent laser radar at 2 μ m using solid state lasers", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 31, sid. 4-15, 1993.
- 24 L. Cohen, *Time-frequency analysis*, Prentice Hall, New-Jersey, 1995.
- 25 J. Streicher, "Overview on signal processing for Doppler wind lidar", *Proc. 9th Conference on Coherent Laser Radar*, sid. 192-193, Linköping 23-27 juni 1997
- 26 B. J. Rye and R. M. Hardesty, "Discrete spectral peak estimation in incoherent backscatter heterodyne lidar. II: Correlogram accumulation", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 31, s. 28-35, 1993.
- 27 H. L. Van Trees, *Detection, estimation and modulation theory*, John Wiley and Sons, New York, 1968.
- 28 R. T. H. Collis och P. B. Russell, "Lidar measurement of particles and gases by elastic backscattering and differential absorption", in *Laser monitoring of the atmosphere*, Editor: E. D. Hinkley, Springer Verlag, 1976.
- 29 F. Jani, "Statistisk analys av mätdata för optisk transmission i atmosfären", examensarbete vid matematiska institutionen, ISRN-LiU-MAT-D-95/01-SE; Linköpings universitet, mars 1995.
- 30 B. Nilsson, "Model of the relation between aerosol extinction and meteorological parameters", *Atmospheric Environment*, vol. 28, sid. 815-825, 1994.
- 31 J. D. Spinhirne, J.A. Reagan och B.M. Herman, "Vertical distribution of aerosol extinction cross section and inference of aerosol imaginary index in the troposphere by lidar technique", *Journal of Applied Meteorology*, vol. 19, sid. 426-438, 1980.
- 32 R. R. Beland, "Propagation through atmospheric optical turbulence" in *The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook*, vol 2, Ed. F. G. Smith, Infrared information analysis center and SPIE optical engineering press, 1993.
- 33 L. C. Andrews and R. L. Phillips, *Laser beam propagation through random media*, SPIE press, 1998.
- 34 O. Steinvall, "Performance of coherent and direct detection laser radars for hard target applications", FOA-R--95-00197-3.1--SE, 1995.
- 35 R. Targ, M. J. Kavaya, R. M. Huffaker and R. L. Bowles, "Coherent lidar airborne wind-shear sensor: performance evaluation", *Appl. Opt.*, vol. 30, sid. 2013-2026, 1991.

- 36 T. S. Chu och D. C. Hogg, "Effects of precipitation on propagation at 0.63, 3.5 and 10.6 microns", Bell Syst. Tech. J., vol. 47, sid. 723-759, 1968.
- 37 E. P. Shettle och R. W. Fenn, "Models for the aerosols of the lower atmosphere and the effects of humidity variations on their optical properties", Report AFGL-TR-79-0214, Air Force Geophysics Laboratory, September 1979.
- 38 J. C. Dainty, *Laser speckle and related phenomena*, Topics in applied physics, vol. 9, 1984 (Berlin, Springer).
- 39 N. Levanon, *Radar principles*, John Wiley&Sons, 1988.
- 40 S. M. Hannon, S. W. Henderson, J. A. Thomson och P. Gatt, "Autonomous wind field sensor: performance predictions", SPIE vol. 2832, p 76-90, 1996.
- 41 A. A. Woodfield and J. M. Vaughan, "Airspeed and wind shear measurements with an airborne CO₂ CW laser", J. Aviation Safety, vol. 1, sid. 207-224, 1983.
- 42 J. Rothmel, D. A. Bowdle and J. M. Vaughan, "Calculation of aerosol backscatter from airborne continuous wave focused CO₂ doppler lidar measurements, 1, Algorithm description" and "Calculation of aerosol backscatter from airborne continuous wave focused CO₂ doppler lidar measurements, 2, Algorithm performance", J. Geophys. Research, vol. 96, sid. 5293-5305, 1991.
- 43 J. M. Vaughan, D. W. Brown, C. Nash, S. B. Alejandro and G. G. Koenig, "Atlantic atmospheric aerosol studies 2. Compendium of airborne backscatter measurements at 10.6 μ m", J. Geophys. Research, vol. 100, sid. 1043-1065, 1995.
- 44 B. Morbieu, H. Combe and J. Mandle, "ALEV 3, a 3 axis CO₂ CW anemometer for aircraft installation", sid. 39-42, Proc. 7th conf. on coherent laser radar, 1993.
- 45 J. Mandle, "A laser anemometer reference for air data calibration", NAECON, vol. 1, sid. 300-308, IEEE, 1988.
- 46 B. Morbieu and J. Mandle, "Airspeed measurement with a CO₂ lidar", SPIE vol. 656, sid. 220-224.
- 47 T. J. Kane, J. D. Kmetec and T. J. Wagener, "Flight test of 2- μ m diode pumped laser radar system", Proceedings of the SPIE, vol. 2464, sid. 103-108, 1995.
- 48 T. J. Wagener, N. Demma, J. D. Kmetec and T. S. Kubo, "2 μ m lidar for laser based remote sensing: flight demonstration and application survey", IEEE, sid. 574-579, 1994.
- 49 R. Bogue, R. McGann, T. Wagener, J. Abbiss, A. Smart, "Comparative optical measurements of airspeed and aerosols on a DC-8 aircraft", IEEE, 56.1-56.25, 1995.
- 50 G. M. Hogg, "CLARA – a coherent CO₂ multi-mode laser radar", Proc. 9th conf. on coherent laser radar, 1997.
- 51 S. W. Henderson, C. P. Hale, J. R. Magee, M. J. Kavaya och A. V. Huffaker, "Eye-safe coherent laser radar system at 2.1 microns using Tm,Ho:YAG lasers", Opt. Lett. vol. 16, sid. 773-775, 1991.
- 52 P. L. Rogers, "Optical air data measurement system", US patent 4,483,614 (1984).
- 53 P. L. Rogers, "Fluorescent air data measurement device", US patent 4,572,667 (1986).
- 54 P. L. Rogers and M. Rogers, "Wind shear detector", US patent 4,875,770 (1989).
- 55 K. J. Vahala and P. L. Rogers, "Laser Doppler velocimeter", US patent 5,272,513 (1993).

- 56 K. J. Vahala and P. L. Rogers, "Laser Doppler velocimeter", US patent 6,141,086 (2000).
- 57 Internet: <http://www.cerfacs.fr/~wakenet/>, June, 2002.

Appendix 1

Signal/brusförhållande vid koherent detektion

Vi skall ta fram ett uttryck för signal/brus-förhållandet vid koherent detektion. Antag att två vågor med elektriska fält E_1 och E_2 som har samma polarisationstillstånd interfererar. Irradiansen I i någon punkt är proportionell mot fälten enligt

$$I \propto EE^*, \quad (\text{A-1})$$

där $E=E_1 + E_2$. I en komplex representation, med faserna α_1 och α_2 och amplituderna E_{01} och E_{02} blir

$$I \propto (E_{01}e^{i\alpha_1} + E_{02}e^{i\alpha_2})(E_{01}e^{-i\alpha_1} + E_{02}e^{-i\alpha_2}) = E_{01}^2 + E_{02}^2 + E_{01}E_{02}e^{i(\alpha_1-\alpha_2)} + E_{01}E_{02}e^{-i(\alpha_1-\alpha_2)}, \quad (\text{A-2})$$

där de två sista termerna är interferenstermer. Summan av dem blir (vi utnyttjar att $z+z^* = 2 \operatorname{Re} z$)

$$2E_{01}E_{02}\cos(\alpha_1 - \alpha_2). \quad (\text{A-3})$$

För plana vågor ges faserna av $\alpha_1(t) = \omega_1 t - k_1 z + \varphi_1$ och $\alpha_2(t) = \omega_2 t - k_2 z + \varphi_2$; där $\omega=2\pi f$ är vinkelfrekvensen, f är frekvensen, $k=2\pi/\lambda$ är vågtalet och λ är våglängden. Således kan irradiansen skrivas

$$I \propto E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02}\cos(\Delta\omega t - \Delta k z + \Delta\varphi), \quad (\text{A-4})$$

där Δ indikerar skillnaden för respektive storhet. Vid ett visst läge z motsvarar $\Delta k z$ en konstant fas, varför denna term hädanefter är inkluderad i $\Delta\varphi$. Om dessa vågor faller in mot en detektor genererar irradiansen en ström i varje punkt på detektorytan. Om alla strömbidrag från hela detektorytan integreras, fås en detektorström (i_{det}) enligt (här byter vi beteckningar till sådana som är vanliga då man diskuterar koherent laserradar)

$$i_{det}(t) = \Re(P_{LO} + P_{mot} + 2\sqrt{P_{LO}P_{mot}}\sin[2\pi(f_{LO} - f_{mot})t + \varphi_0]). \quad (\text{A-5})$$

P_{LO} är LO-effekten, P_{mot} är mottagen effekt från målet, $\Re$ är responsiviteten [A/W] för detektorn och φ_0 anger en konstant fastterm. Vi har antagit deterministiska fält, ideal koherens (både tids- och rumsmässigt) samt en konstant frekvensskillnad ($f_{LO}-f_{mot}$) mellan LO och mål-reflex. Responsiviteten för detektorn kan skrivas

$$\Re = \eta_{det} \frac{e}{hf}, \quad (\text{A-6})$$

där η_{det} är kvantverkningsgraden för detektorn, e är elektronladdningen och h är Plancks konstant.

Om den reflekterade strålningen härrör från partiklar i luften kan deras hastighet mätas eftersom skillnadsfrekvensen beror på Dopplerskiftet som ges av

$$f_D = \frac{2v_r}{\lambda} \quad (\text{A-7})$$

där v_r är relativa radiella hastigheten. P_{mot} beror på vilken typ av mål som är aktuellt samt dess reflektionsegenskaper, avståndet till målet, våglängden och på optikstorleken. Effektivvärdet (i_{rms}) av heterodynsignalen i_h ges av

$$\sqrt{\langle i_h^2 \rangle} = i_{rms} = \sqrt{2\Re} \sqrt{P_{LO} P_{mot}} . \quad (A-8)$$

Hagelbruset från en detektor, där den dominerande optiska effekten är LO-effekt, ges av

$$\langle i_{hagel}^2 \rangle = 2e\Re P_{LO} B , \quad (A-9)$$

där B är bandbredden för detektorn eller efterföljande signalbehandlingskedja. Signal-brusförhållandet (SNR) ges av

$$SNR = \frac{P_{signal}}{P_{brus}} = \frac{\langle i_h^2 \rangle R_{last}}{\langle i_{brus}^2 \rangle R_{last}} = \frac{\langle i_h^2 \rangle}{\langle i_{hagel}^2 \rangle + \langle i_{term, först}^2 \rangle} , \quad (A-10)$$

där P_{signal} är signalens effekt, P_{brus} är bruseffekten och R_{last} är ett belastningsmotstånd och $\langle i_{term, först}^2 \rangle$ motsvarar brus från förförstärkare samt termiskt brus. I det fall vi har *hagelbrusdominerad detektion*, vilket åstadkommes med en tillräckligt hög LO-effekt, blir

$$SNR \approx \frac{2\Re^2 P_{LO} P_{mot}}{2e\Re P_{LO} B} = \frac{\Re P_{mot}}{eB} = \frac{\eta_{det} P_{mot}}{hfB} = \frac{\eta_{det} P_{mot} \lambda}{hcB} , \quad (A-11)$$

där c är ljushastigheten. Notera beroendet på mottagen effekt P_{mot} , detektorns kvantverkningsgrad, våglängden och bandbredden. Känsligheten för ett system kan inte bli högre än då det är fullständigt dominerat av hagelbrus, dvs. *koherent detektion ger största möjliga SNR för given lasereffekt*.

Appendix 2

SNR för vindmätning, det allmänna fallet

I det allmänna fallet måste hänsyn tagas till dämpning och refraktiv turbulens i atmosfären, vågfrontsmatchning och polarisationsmatchning mellan LO och reflekterad målstrålning, avståndsberoende systemkänslighet mm. Frehlich och Kavaya [i] har härlett generella formler för SNR för CLR-system. I allmänhet finns inte analytiska lösningar. I ett specialfall, nämligen för ett Gaussiskt matchat monostatiskt system, fås emellertid analytiska lösningar vilka redovisas nedan.

För en homogen atmosfär (lateralt) kan SNR skrivas som [i]

$$SNR(t) = \frac{\eta_{det} \lambda}{hcB} \int_0^{\infty} P_{las} \left(t - \frac{2R}{c} \right) [T_{atm}(R)]^2 \beta_{\pi}(R) C(R, t) dR, \quad (A-12)$$

där $P_{las}(t, R)$ är avståndsviktningfunktionen pga. den temporala pulsprofilen. T_{atm} är transmissionen genom atmosfären och ges av

$$T_{atm} = e^{-\int_0^R \alpha_e(R) dR} = [\text{om } \alpha_e \text{ oberoende av } R] = e^{-\alpha_e R}, \quad (A-13)$$

där α_e är extinktionskoefficienten. $C(R, t)$ är den koherenta responsiviteten. $C(R, t)$ beror bl.a. på vågfrontsmatchning mellan LO och reflekterad strålning. Integralen motsvarar en summering av reflekterad effekt viktad med funktionen

$$[T_{atm}(R)]^2 C(R, t). \quad (A-14)$$

Integralen motsvarar således en effektiv mottagen effekt. För ett Gaussiskt CLR-system kan $C(R)$ skrivas som [i]

$$C(R) = \frac{\pi \sigma_{TE}^2 \sigma_{RE}^2}{\left[\frac{1}{4} + \frac{\sigma_{LO}^2}{4\sigma_R^2} + \frac{\sigma_{LO}^2}{4\sigma_{TE}^2} + \left(1 - \frac{R}{F_{TE}}\right)^2 \frac{k^2 \sigma_{TE}^2 \sigma_{LO}^2}{4R^2} + \left(1 - \frac{R}{F_{RE}}\right)^2 \frac{k^2 \sigma_{RE}^2 \sigma_{LO}^2}{4R^2} + \frac{\sigma_{LO}^2}{\rho_0^2(R)} \right] \sigma_L^2 R^2}. \quad (A-15)$$

Här står σ för strålradien l/e (intensitet) och motsvarar således $w/\sqrt{2}$ där w är strålradien l/e^2 , intensitet. σ_{LO} (lokalscillatorstråle), σ_L (laserstråle), σ_R (mottagarradie, Gaussisk aperturfunktion), σ_{RE} (mottaget fält), σ_{TE} (transmitterat fält). F står för fokuseringsavstånd (vågfrontsradie) och ρ_0 står för transversell koherenslängd som ges av

$$\rho_0(R) = \left(H k^2 \int_0^R C_n^2(r) \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{5/3} dr \right)^{-3/5}, \quad (A-16)$$

där H är konstant=2,91 och $C_n^2(r)$ är strukturparametern för brytningsindex. Om elevationsvinkeln för laserstrålen är θ_{el} blir

$$C_n^2(r) = C_n^2(höjd = 1) \frac{1}{(1 + r \cdot \sin \theta_{el})^{2/3}}. \quad (A-17)$$

För ett matchat monostatiskt system är mottagaroptik och sändaroptik densamma. Om vi dessutom antar att mottagarradien är mycket större än LO-strålens radie kan $C(R)$ förenklas till

$$C(R) = \frac{\pi w_0^2}{R^2 \left[1 + \frac{w_0^2}{\rho_0^2(R)} + \left(\frac{\pi w_0^2}{\lambda R} \right)^2 \left(1 - \frac{R}{F} \right)^2 \right]}, \quad (\text{A-18})$$

där w_0 är strålradien ($1/e^2$, intensitet) vid sändar-/mottagaroptiken. Ekvationerna (A-12) och (A-18) ger nu ett uttryck som kan användas för att studera SNR för olika CLR-system.

För realistiska system måste också transmission i sändaroptik T_{tra} och mottagaroptik T_{rec} inkluderas i SNR-formeln. Total transmission genom optiken T_{opt} blir då

$$T_{opt} = T_{tra} T_{rec}. \quad (\text{A-19})$$

I ett skannande system uppkommer en signalförlust då synfältet för lasersystemet ändrar sig under tiden laserstrålningen färdas fram och tillbaka till målet. Förlustfaktorn kan tecknas [ii]

$$\eta_\theta = e^{-\left(\frac{\theta_{tid} R}{w(R)} \right)^2}, \quad (\text{A-20})$$

där θ_{tid} är tidsförskjutningsvinkeln, R är avståndet till målet och $w(R)$ är strålradien vid avståndet R . Om f_{skan} är rotationsfrekvensen för skannern kan förlustfaktorn skrivas

$$\eta_\theta = e^{-\left(\frac{4\pi f_{skan} R^2}{cw(R)} \right)^2}. \quad (\text{A-21})$$

Strålradien i fokus $w(R)$ är approximativt proportionell mot R och omvänt proportionellt mot diameter D på teleskopaperturen

$$w \approx \frac{R\lambda}{D}. \quad (\text{A-22})$$

Således ges förlustfaktorn approximativt av

$$\eta_\theta \approx e^{-\left(\frac{4\pi f_{skan} R^2}{c \frac{R\lambda}{D}} \right)^2} = e^{-\left(\frac{4\pi f_{skan} RD}{c\lambda} \right)^2}, \quad (\text{A-23})$$

där det framgår att förlustfaktorn blir större med ökande R , D och f_{skan} .

Ytterligare ett antagande, nämligen att bakåtspridningskoefficienten β_π är oberoende av avstånd, leder till uttrycket

$$SNR(t) = \frac{\eta_{det} \eta_\theta T_{opt} \beta_\pi \lambda}{hcB} \int_0^\infty P_{las} \left(t - \frac{2R}{c} \right) [T_{alm}(R)] \frac{\pi w_0^2}{R^2 \left[1 + \frac{w_0^2}{\rho_0^2(R)} + \left(\frac{\pi w_0^2}{\lambda R} \right)^2 \left(1 - \frac{R}{F} \right)^2 \right]} dR. \quad (\text{A-24})$$

Notera att ibland används den verkliga aperturarean A_{rec} . Den effektiva aperturarean A_{eff} för ett Gaussiskt matchat otrunkerat monostatiskt system ges av [iii, iv]

$$A_{eff} = \eta_h A_{rec} = \pi w_0^2, \quad (A-25)$$

där η_h är heterodynverkningsgraden. Ofta väljs en diameter på optiken $D=3w_0$ vilket leder till ej försumbar trunkering och således att antagandet om otrunkerat system inte är helt korrekt. Rye och Frehlich [iv] har studerat vilken trunkering som ger maximal systemverkningsgrad (i vilken heterodynverkningsgraden ingår) för given optikstorlek. Det visar sig att ekvation (A-24) är en acceptabel approximation för normala trunkeringar, t.ex. då $D=3w_0$. Ofta antas η_h vara runt 0,4.

SNR för ett CW-system

CW-system karakteriseras av en konstant lasereffekt vilket betyder att P_{las} kan flyttas utanför integralen i ekvation (A-24). Ofta är räckvidden för vindmätande CW-system begränsad beroende bl.a. på den relativt låga uteffekten från CW-lasrar och därmed kan atmosfärspåverkan (refraktiv turbulens och dämpning) försummas i vindsammanhang. SNR-uttrycket förenklas då till

$$SNR = \frac{\eta_{det}\eta_{\theta}T_{opt}\beta_{\pi}P_{las}\lambda}{hcB} \int_0^{\infty} \frac{\pi w_0^2}{R^2 \left[1 + \left(\frac{\pi w_0^2}{\lambda R} \right)^2 \left(1 - \frac{R}{F} \right)^2 \right]} dR. \quad (A-26)$$

Integralen är analytiskt lösbar och SNR blir [v, vi]

$$\begin{aligned} SNR &= \frac{\eta_{det}\eta_{\theta}T_{opt}\beta_{\pi}P_{las}\lambda}{hcB} \left[\frac{2}{2/\lambda} \arctan \left(\frac{\lambda R}{\pi w_0^2} - \frac{\pi w_0^2}{\lambda F} \left(1 - \frac{R}{F} \right) \right) \right]_0^{\infty} = \\ &= \frac{\eta_{det}\eta_{\theta}\beta_{\pi}P_{las}\lambda^2}{hcB} \left(\frac{\pi}{2} + \arctan \left(\frac{\pi w_0^2}{\lambda F} \right) \right) \end{aligned} \quad (A-27)$$

Sonnenschein och Horrigan [vi] betecknar den sista termen med F . Vi använder F_{fok} för att skilja på F =fokuseringsavstånd och F_{fok} =”fokuseringsfaktor”.

$$F_{fok} = \frac{\pi}{2} + \arctan \left(\frac{\pi w_0^2}{\lambda F} \right). \quad (A-28)$$

Jämförelse med den enkla modellen, beskriven i avsnitt 3.2.2, ger att SNR (enligt ekvation (A-27)) skiljer sig endast på F_{fok} som kan vara mellan $\pi/2$ och π . I den enkla modellen är faktorn 2. Notera att $F_{fok}=1$ i [vi] vilket är fel på en faktor 2 enligt [v].

SNR för ett pulsat system (kort puls)

SNR för ett pulsat system ska beräknas enligt ekvation (A-24). Ofta antas att pulsen är kort [i]; tillräckligt kort för att $C(R)$ och $T_{am}(R)$ ska vara konstanta inom pulslängden och då antar givna värden för ett specifikt avstånd. I integralen i ekvation (A-24) finns då endast P_{las} kvar och integralen blir (för enkelhetens skull antar vi en rektangulär puls)

$$\int_0^{\infty} P_{las} \left(t - \frac{2R}{c} \right) dR = \int_{R-\frac{\Delta r}{2}}^{R+\frac{\Delta r}{2}} P_{las} dR = P_{las} \cdot \Delta r = P_{las} \frac{c\Delta t}{2} = \frac{E_{las}c}{2}, \quad (A-29)$$

där Δr är längden på den rektangulära avståndsviktningsfunktionen, E_{las} är pulsenergin och således blir

$$SNR = \frac{\eta_{det}\eta_{\theta}T_{opt}\beta_{\pi}\lambda E_{las}c\pi w_0^2 [T_{atm}(R)]^2}{2hcBR^2 \left[1 + \frac{w_0^2}{\rho_0^2(R)} + \left(\frac{\pi w^2}{\lambda R} \right)^2 \left(1 - \frac{R}{F} \right)^2 \right]}. \quad (A-30)$$

Ekvation (A-30) används ofta för att uppskatta prestanda för vindmätande pulssade CLR-system [i].

Referenser

- i R. G. Frehlich och M. J. Kavaya, "Coherent laser radar performance for general atmospheric refractive turbulence", Appl. Opt., vol. 30, 5325-5352, 1991.
- ii I. Renhorn och D. Letalick, "Laser radar performance degradation due to lag angle phenomena", 7th Conference on Coherent Laser Radar Applications and Technology, July 19-23, Paris, 1993.
- iii B. J. Rye, "Primary aberration contribution to incoherent heterodyne lidar returns", Appl. Opt., vol. 21, sid. 839-844, 1982.
- iv B. J. Rye and R. G. Frehlich, "Optimal truncation and optical efficiency of an apertured coherent lidar focused on an incoherent backscatter target", Appl. Opt., vol. 31, sid. 2891-2899, 1992.
- v M. J. Kavaya och P. J. M. Suni, "Continuous wave coherent laser radar: calculation of measurement location and volume", Appl. Opt., vol. 30, sid. 2634-2642, 1991.
- vi C. M. Sonnenschein och F. A. Horrigan, "Signal-to-noise ratio for coaxial systems that heterodyne backscatter from the atmosphere", Appl. Opt., vol. 10, sid. 1600-1604, 1971.

Appendix 3

Väderstatistik

För att bedöma tillgänglighet och utformning av en laservindmätare tillfrågades Studiesektionen vid OPIL OPL/FM VÄDC om statistik över sikt, molnmängd och vind för hav, kust och inland i norra, mellersta respektive södra Sverige. För norra Sverige dessutom statistiken för fjäll. Nedan redovisas den sammanställning som FM VÄDC bidragit med.

Markobservationer 1983-1997 (6-24 per dygn) från stationerna Holmögadd, Luleå, Gunnarn, Storlien/Visjövalen, Landsort, Söderhamn, Malung, Vinga, Falsterbo och Jönköping har använts. För höjdvindarna har samtliga observationer (upp till fyra per dygn) använts. Luleå 1974-1997, Bromma 1974-1995 och Göteborg 1974-1997. För Holmögadd och Landsort är sikten fördelad på annat sätt än övriga beroende på att de observerat med lägre upplösning / enligt annan skala under stor del av eller hela tiden. Det beror på att de haft mindre teknisk möjlighet att upplösa sikten.

Siktfrekvenser (%)

Holmögadd

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
0-50 m	0.1	0.1	0.4	0.2	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
50-500 m	1.2	1.9	3.6	4.2	2.5	3.6	2.0	0.8	1.5	2.2	0.3	1.4
500-1000 m	1.6	2.1	3.6	2.5	1.8	2.1	1.6	0.9	0.8	2.1	0.7	0.9
1-2 km	2.8	2.8	4.1	2.0	1.1	1.7	0.8	0.9	0.5	1.2	1.5	2.1
2-4 km	5.4	5.5	7.6	4.2	2.1	2.7	1.9	1.6	1.2	1.4	2.9	3.9
4-10 km	9.5	9.7	12.9	7.1	5.3	5.8	4.9	3.4	4.0	4.9	6.5	7.8
10-20 km	16.9	19.9	19.4	13.5	12.4	12.7	16.1	16.1	13.5	15.9	16.5	16.3
>20 km	62.4	58.0	48.5	66.3	74.8	71.4	72.7	76.4	78.6	72.2	71.5	67.6

Luleå

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
0-100 m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
100-500 m	0.6	1.0	1.8	3.0	1.4	0.7	0.3	0.6	1.4	1.8	0.6	0.6
500-1000 m	1.5	2.0	3.0	2.9	1.1	0.6	0.3	0.5	1.1	2.0	1.5	1.2
1-2 km	2.8	2.5	2.9	1.4	0.8	0.5	0.2	0.4	0.5	1.2	1.5	1.8
2-5 km	8.0	7.8	9.9	4.5	2.0	1.3	1.4	1.6	1.9	3.4	5.6	6.4
5-10 km	12.6	12.2	15.3	6.9	4.0	3.6	4.8	5.9	6.4	9.5	13.9	11.4
10-30 km	15.5	17.2	18.1	13.4	13.8	14.4	15.0	15.6	16.0	17.7	18.2	16.8
>30 km	59.1	57.3	49.1	67.9	76.8	78.8	78.0	75.3	72.8	64.4	58.6	61.6

Gunnarn

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
0-100 m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
100-500 m	0.6	0.5	0.3	0.8	0.2	0.3	0.2	1.5	2.0	1.2	0.8	0.4
500-1000 m	2.5	1.0	0.7	0.9	0.4	0.3	0.4	1.4	2.2	2.5	2.9	1.8
1-2 km	2.5	1.5	2.1	1.5	0.8	0.2	0.1	0.3	1.1	3.2	3.2	2.0
2-5 km	9.7	8.8	11.0	5.4	3.6	2.9	2.8	4.1	6.4	9.9	13.9	10.1
5-10 km	9.1	8.6	11.7	5.0	4.7	3.7	4.7	5.1	6.7	9.3	9.3	10.2
10-30 km	18.0	16.1	22.8	17.9	17.7	16.6	14.3	17.2	17.1	13.7	15.1	15.7
>30 km	57.5	63.5	51.4	68.4	72.7	76.1	77.5	70.4	64.5	60.2	54.9	59.8

Storlien/Visjövalen

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
0-100 m	0.4	0.3	0.3	0.4	0.2	0.8	0.6	0.5	0.0	0.1	0.0	0.3
100-500 m	2.2	1.4	1.5	3.0	2.1	3.4	2.7	2.4	2.1	1.9	2.0	2.2
500-1000 m	2.8	2.2	2.6	1.3	1.1	1.1	1.7	0.8	0.9	1.3	2.1	3.6
1-2 km	3.6	2.9	2.1	2.1	1.5	0.8	1.1	1.3	1.0	1.5	2.9	3.3
2-5 km	12.7	11.9	8.7	8.1	6.1	4.0	6.4	5.2	8.2	8.2	12.2	12.5
5-10 km	6.0	5.3	4.9	4.8	3.0	3.9	4.5	4.5	6.2	6.5	5.6	5.6
10-30 km	18.6	19.2	22.4	24.2	20.8	19.4	21.9	23.5	24.2	24.2	18.8	20.0
>30 km	53.6	56.8	57.5	56.2	65.2	66.7	61.2	61.8	57.5	56.3	56.5	52.4

Landsort

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
0-50 m	0.0	0.1	0.4	0.4	0.4	0.1	0.1	0.0	0.2	0.3	0.2	0.1
50-500 m	2.5	1.1	4.5	4.7	4.6	2.4	0.6	0.7	0.7	2.9	1.7	1.4
500-1000 m	1.3	0.8	2.2	1.4	1.5	0.6	0.2	0.4	0.3	1.4	1.0	1.1
1-2 km	2.8	2.6	2.7	1.8	0.9	0.6	0.5	0.4	0.5	1.6	2.2	1.9
2-4 km	6.4	6.9	7.8	6.3	2.2	2.7	1.8	1.8	1.7	5.6	4.9	5.3
4-10 km	13.9	15.7	15.7	15.1	8.1	10.1	7.2	12.4	6.4	11.5	12.8	16.5
10-20 km	24.7	26.2	22.7	19.2	16.4	22.3	18.4	24.4	16.5	18.1	24.3	23.5
>20 km	48.3	46.5	44.0	51.1	65.9	61.2	71.2	59.9	73.8	58.5	52.9	50.2

Söderhamn

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
0-100 m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
100-500 m	0.7	0.5	1.0	1.8	1.0	1.4	0.5	1.2	0.9	1.4	1.0	0.8
500-1000 m	0.8	1.2	1.8	2.0	1.0	1.1	0.9	1.2	0.9	1.2	1.5	1.2
1-2 km	3.3	2.7	2.8	2.6	0.9	1.0	0.5	0.5	0.6	1.4	2.2	1.9
2-5 km	8.9	7.9	9.4	6.7	4.1	3.9	2.5	3.4	3.3	6.0	7.4	6.2
5-10 km	8.0	7.7	9.0	6.2	3.7	4.5	3.8	5.0	5.1	7.6	9.3	8.3
10-30 km	21.0	19.7	21.8	17.0	14.7	15.9	15.0	18.4	18.8	18.5	22.0	23.5
>30 km	57.3	60.3	54.1	63.6	74.4	72.2	76.7	70.2	70.2	63.9	56.6	58.0

Malung

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
0-100 m	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.4	0.5	0.6	0.2	0.1
100-500 m	0.8	0.8	1.1	0.9	0.4	0.8	0.6	1.2	1.4	1.7	1.5	1.2
500-1000 m	2.5	1.9	1.8	1.7	1.0	0.9	0.6	1.4	1.8	3.1	2.9	1.7
1-2 km	9.2	6.4	9.3	4.9	2.9	2.6	1.1	3.4	4.1	10.1	10.9	8.0
2-5 km	19.1	18.4	17.9	17.2	10.7	9.3	7.0	15.1	14.9	19.6	21.6	21.4
5-10 km	3.8	3.3	2.6	3.8	3.3	4.6	5.6	4.8	4.9	4.1	4.7	4.2
10-30 km	9.6	11.8	11.0	10.8	10.9	12.4	12.6	12.8	9.6	9.0	10.1	12.1
>30 km	55.0	57.2	56.1	60.5	70.7	69.3	72.3	60.8	62.7	51.7	48.1	51.3

Vinga

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
0-100 m	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
100-500 m	4.8	2.0	3.8	3.2	0.9	0.4	0.1	0.1	0.2	1.1	1.0	2.4
500-1000 m	2.3	0.9	1.5	1.2	0.6	0.2	0.2	0.1	0.0	0.6	0.4	1.2
1-2 km	3.3	3.6	3.0	2.4	0.9	0.5	0.1	0.2	0.2	1.6	1.1	3.0
2-5 km	8.4	12.3	9.7	6.8	3.5	2.0	2.2	1.7	2.6	7.3	8.4	9.6
5-10 km	15.4	17.5	13.9	15.8	11.1	11.2	9.5	7.8	8.8	16.1	16.3	16.1
10-30 km	40.6	33.9	40.4	36.6	40.1	43.1	41.2	45.0	33.1	39.7	38.1	36.2
>30 km	25.0	29.8	27.4	33.8	42.7	42.5	46.7	45.2	55.2	33.4	34.6	31.4

Falsterbo

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
0-100 m	0.7	0.4	1.4	0.9	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.5	0.4	0.1
100-500 m	3.2	3.2	3.5	3.1	1.2	0.5	0.4	0.3	0.2	1.3	0.9	1.6
500-1000 m	2.3	2.0	2.8	2.0	0.6	0.5	0.3	0.4	0.6	1.3	1.7	1.8
1-2 km	7.1	7.8	9.7	5.0	2.6	1.7	1.7	1.9	1.9	6.2	6.3	5.8
2-5 km	20.3	22.8	22.7	20.7	12.8	11.1	11.0	10.5	11.0	19.1	18.3	23.5
5-10 km	17.1	16.8	16.6	18.2	16.0	17.4	11.9	14.7	11.1	14.0	15.8	16.8
10-30 km	38.4	36.1	30.6	31.9	35.7	42.0	40.0	42.8	41.9	31.9	35.9	37.2
>30 km	10.9	11.1	12.7	18.2	31.0	26.6	34.5	29.1	33.2	25.6	20.6	13.2

Jönköping

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
0-100 m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0
100-500 m	0.7	0.7	0.6	2.9	0.6	0.5	0.2	0.7	0.8	2.4	0.7	1.0
500-1000 m	1.3	0.9	1.0	1.4	0.6	0.6	0.5	0.8	0.9	1.7	1.5	1.8
1-2 km	2.7	1.8	2.3	2.2	0.6	0.4	0.3	0.5	0.6	1.3	2.4	3.1
2-5 km	18.8	17.4	15.3	9.9	3.5	2.9	2.5	3.3	5.6	10.8	15.5	19.7
5-10 km	24.8	24.0	21.1	11.3	8.5	8.3	6.9	9.3	11.0	16.4	17.7	18.9
10-30 km	32.9	32.2	32.3	34.9	30.0	37.4	33.1	36.5	31.9	32.2	32.6	27.3
>30 km	18.8	22.9	27.3	37.4	56.2	50.0	56.5	48.9	49.1	35.0	29.6	28.2

Molnfördelning

Dimfrekvensen är frekvensen av alla observationer under månaden. Övriga frekvenser är fördelningen av lägsta molnbas vid varje fall av samlad molnmängd, dvs. summan varje månad är 100%.

Holmögadd

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
Dimma	1.0	1.7	3.4	4.5	2.1	2.9	2.0	0.7	1.4	1.9	0.4	1.2

0-2/8

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
0-200 m	10.7	5.2	2.2	0.9	0.6	1.0	1.3	1.1	2.8	1.7	2.7	3.2
200-1000 m	17.0	15.4	17.8	24.7	33.9	42.5	51.8	50.4	43.5	29.5	26.4	20.3
1000-2500 m	22.3	17.8	17.2	17.7	20.3	16.1	20.6	19.4	17.9	18.7	20.1	23.5
>2500 m	50.0	61.6	62.8	56.7	45.1	40.4	26.4	29.0	35.8	50.1	50.9	53.0

3-4/8

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
0-200 m	10.4	4.4	4.2	1.6	0.9	2.0	1.8	0.9	2.4	1.4	2.1	4.4
200-1000 m	43.1	52.5	52.6	44.6	59.5	65.6	74.9	80.4	76.7	57.3	54.1	51.7
1000-2500 m	37.5	29.7	33.2	29.2	24.3	20.1	15.4	14.8	16.5	27.4	32.1	34.6
>2500 m	9.0	13.5	10.0	24.6	15.3	12.2	7.9	3.9	4.4	13.8	11.6	9.3

5-6/8

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
0-200 m	9.2	6.6	6.5	1.5	0.4	1.5	1.4	2.4	3.2	3.3	6.5	6.7
200-1000 m	63.3	61.4	63.6	59.3	64.8	74.0	85.5	83.2	83.0	67.6	64.6	70.1
1000-2500 m	21.1	24.1	20.7	22.6	24.1	15.7	9.0	12.0	11.1	21.8	20.6	18.3
>2500 m	6.4	7.9	9.2	16.6	10.7	8.7	4.1	2.4	2.7	7.3	8.3	4.9

7-8/8

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
0-200 m	19.8	18.1	25.1	12.3	8.0	14.1	10.3	11.4	11.0	17.4	18.4	12.5
200-1000 m	70.1	68.2	63.9	66.5	74.3	73.9	82.3	81.1	82.5	73.0	74.1	77.3
1000-2500 m	8.8	11.7	9.4	15.3	14.4	8.2	5.0	6.2	5.1	7.7	6.1	9.0
>2500 m	1.3	2.1	1.6	5.8	3.2	3.8	2.4	1.4	1.4	1.9	1.4	1.2

Luleå

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
Dimma	1.3	1.9	3.1	4.4	1.6	1.0	0.4	0.7	1.3	2.5	1.1	1.1

0-2/8

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
0-200 m	4.1	6.5	2.1	0.7	1.3	0.5	0.4	1.2	1.3	0.9	3.7	2.9
200-1000 m	6.3	5.6	5.7	3.9	3.6	5.1	9.0	9.0	11.5	13.4	12.7	10.8
1000-2500 m	15.8	13.9	18.3	32.0	37.1	44.3	49.9	50.3	43.7	26.0	20.9	13.6
>2500 m	73.7	73.9	73.9	63.3	57.9	50.1	40.7	39.5	43.5	59.6	62.7	72.7

3-4/8

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
0-200 m	9.8	11.5	6.8	2.7	1.0	1.8	1.1	2.1	1.3	2.8	4.9	7.6
200-1000 m	13.0	14.9	12.8	8.5	5.9	10.4	14.8	18.3	19.6	19.2	19.4	17.0
1000-2500 m	23.8	22.7	31.0	49.4	58.9	53.4	54.2	53.6	52.3	32.0	26.3	24.2
>2500 m	53.5	51.0	49.5	39.4	34.2	34.5	29.9	26.0	26.8	46.0	49.5	51.2

5-6/8

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
0-200 m	6.2	8.8	8.6	3.5	1.9	1.4	1.4	3.4	4.5	4.0	6.7	6.5
200-1000 m	18.6	19.3	26.0	14.4	9.6	15.3	25.2	30.1	33.0	31.2	24.8	19.0
1000-2500 m	27.7	30.1	31.4	46.0	62.4	57.0	50.5	49.1	45.2	28.0	26.9	26.0
>2500 m	47.5	41.9	34.0	36.1	26.1	26.2	22.9	17.4	17.2	36.8	41.6	48.4

7-8/8

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
0-200 m	29.6	30.8	33.2	27.1	15.4	17.2	15.5	18.9	22.9	29.7	29.8	27.2
200-1000 m	43.7	38.3	43.4	29.1	32.8	35.7	46.5	48.2	52.9	48.3	52.4	46.2
1000-2500 m	13.3	15.6	14.6	29.1	38.8	37.8	29.5	24.7	19.4	12.8	9.9	14.2
>2500 m	13.3	15.3	8.8	14.6	13.0	9.3	8.5	8.2	4.8	9.2	7.9	12.4

Gunnarn

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
Dimma	0.7	0.4	0.3	1.1	0.3	0.2	0.3	1.2	1.9	2.0	1.7	0.6

0-2/8

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
0-200 m	3.8	1.8	0.7	0.2	0.1	0.0	0.0	0.7	0.6	1.6	2.3	3.9
200-1000 m	10.9	12.5	14.4	9.5	5.7	6.3	7.4	15.2	15.6	18.2	14.0	11.6
1000-2500 m	17.1	17.8	21.7	28.9	37.8	50.8	57.1	50.2	38.8	26.9	20.4	21.2
>2500 m	68.2	67.9	63.2	61.5	56.4	42.9	35.5	33.9	45.0	53.3	63.3	63.4

3-4/8

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
0-200 m	5.4	2.5	1.0	0.7	0.2	0.1	0.2	2.1	1.0	2.5	3.5	4.7
200-1000 m	32.3	33.8	41.7	26.9	15.5	14.3	14.6	24.0	33.8	34.8	31.7	30.2
1000-2500 m	34.7	34.0	34.1	50.4	62.5	72.7	71.7	61.5	48.3	37.7	34.6	32.2
>2500 m	27.7	29.7	23.2	22.0	21.8	12.9	13.4	12.4	16.8	25.0	30.2	33.0

5-6/8

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
0-200 m	4.9	2.2	1.5	0.7	0.4	0.5	0.5	1.2	2.4	2.7	5.7	4.8
200-1000 m	37.8	42.1	50.3	39.7	24.1	26.8	28.9	35.7	43.4	45.0	35.9	38.7
1000-2500 m	40.1	34.6	33.1	42.2	63.0	65.0	62.0	55.2	44.5	34.9	35.4	33.8
>2500 m	17.1	21.1	15.1	17.5	12.5	7.8	8.5	7.9	9.7	17.3	23.0	22.7

7-8/8

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
0-200 m	12.0	10.2	8.6	9.8	10.4	11.4	10.0	14.1	19.4	24.9	27.7	17.3
200-1000 m	58.3	60.0	68.2	53.2	50.0	50.0	52.1	56.5	56.6	55.5	52.3	55.7
1000-2500 m	19.2	19.1	16.6	25.5	33.3	33.7	34.1	26.1	20.0	14.5	12.2	18.0
>2500 m	10.5	10.6	6.7	11.5	6.4	4.9	3.7	3.3	4.0	5.1	7.8	9.0

Storlien/Visjövalen

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
Dimma	1.4	0.6	0.6	1.7	1.6	3.2	2.8	2.0	1.5	1.7	1.7	1.5

0-2/8

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
0-200 m	1.1	0.9	0.2	0.7	0.5	0.5	1.9	0.2	0.6	1.3	1.4	2.1
200-1000 m	10.0	11.5	13.1	11.5	10.9	8.7	13.4	11.1	14.0	12.7	11.3	15.9
1000-2500 m	5.8	5.8	7.8	11.9	12.9	24.8	28.7	30.7	16.5	7.7	7.7	3.9
>2500 m	83.1	81.9	78.9	75.9	75.6	66.1	56.1	58.0	68.9	78.3	79.6	78.1

3-4/8

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
0-200 m	4.0	1.3	1.2	1.5	0.8	0.3	1.3	1.4	0.7	4.1	2.9	3.2
200-1000 m	42.0	41.8	39.6	33.9	25.7	28.8	21.4	33.9	36.9	37.1	36.7	44.0
1000-2500 m	14.7	10.3	15.4	17.0	24.9	42.0	48.0	38.2	27.6	13.1	14.1	10.2
>2500 m	39.3	46.6	43.8	47.7	48.6	28.8	29.3	26.4	34.8	45.7	46.3	42.6

5-6/8

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
0-200 m	5.1	2.5	1.4	2.0	1.0	1.8	1.8	2.1	2.7	3.4	3.8	5.3
200-1000 m	55.4	52.5	52.8	44.6	41.9	44.0	39.5	47.4	46.6	56.1	48.2	61.9
1000-2500 m	15.9	16.1	16.4	17.7	23.8	35.4	42.9	35.9	30.0	17.2	17.6	14.6
>2500 m	23.7	29.0	29.4	35.7	33.3	18.8	15.9	14.5	20.6	23.3	30.4	18.2

7-8/8

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
0-200 m	20.4	14.8	14.7	17.9	19.6	21.8	26.8	24.7	26.9	23.6	23.8	20.9
200-1000 m	54.8	60.3	53.6	55.2	55.3	56.9	52.6	55.9	57.3	56.8	53.7	56.7
1000-2500 m	16.5	15.4	19.1	15.0	13.2	14.4	14.3	14.1	10.6	10.6	13.4	14.4
>2500 m	8.4	9.5	12.7	11.9	11.9	7.0	6.3	5.3	5.2	9.0	9.1	8.0

Landsort

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
Dimma	1.2	1.5	4.5	4.5	3.4	2.5	0.3	0.7	0.7	3.0	1.1	1.4

0-2/8

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
0-200 m	0.0	0.8	0.2	0.7	0.6	0.1	0.1	0.3	0.1	0.5	0.4	0.7
200-1000 m	13.3	11.7	17.2	15.7	12.4	21.4	24.9	30.1	28.2	16.3	19.5	13.6
1000-2500 m	12.9	18.7	13.8	20.9	25.3	31.7	29.8	26.6	19.6	15.8	20.4	16.6
>2500 m	73.8	68.8	68.9	62.6	61.6	46.8	45.3	43.0	52.1	67.3	59.8	69.1

3-4/8

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
0-200 m	0.9	0.3	0.0	1.5	1.3	0.7	0.3	0.1	0.5	1.1	0.3	2.6
200-1000 m	51.6	43.0	44.6	41.7	37.1	46.9	48.0	50.7	62.6	52.5	52.7	45.0
1000-2500 m	29.5	32.1	31.5	36.2	35.5	34.8	31.0	35.1	24.0	28.6	27.5	30.5
>2500 m	18.1	24.6	23.8	20.5	26.1	17.7	20.8	14.1	12.9	17.8	19.5	21.9

5-6/8

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
0-200 m	2.1	0.9	1.8	2.2	1.5	1.1	0.7	0.7	1.2	2.1	0.7	1.7
200-1000 m	64.5	59.2	67.3	48.4	51.9	61.3	60.1	67.3	71.7	63.4	69.2	67.5
1000-2500 m	21.8	23.3	17.2	33.0	28.9	26.4	25.8	23.8	15.6	21.8	17.5	22.1
>2500 m	11.5	16.6	13.6	16.3	17.6	11.3	13.5	8.2	11.5	12.7	12.6	8.6

7-8/8

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
0-200 m	4.5	6.7	7.5	7.2	10.2	6.8	5.4	4.0	2.7	6.0	3.6	2.3
200-1000 m	84.8	86.2	80.8	71.3	62.9	67.3	77.7	78.0	87.7	85.8	89.4	89.1
1000-2500 m	6.9	5.3	7.1	16.3	20.1	20.0	11.3	14.1	6.5	4.9	4.8	7.4
>2500 m	3.8	1.8	4.5	5.2	6.8	5.8	5.6	3.9	3.1	3.2	2.2	1.3

Söderhamn

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
Dimma	0.7	0.7	1.4	2.5	1.3	1.9	0.7	1.2	0.5	1.4	1.0	0.9

0-2/8

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
0-200 m	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.0	0.5	0.8	0.5	0.6	0.1
200-1000 m	9.4	11.1	9.0	6.0	4.3	3.5	4.5	10.1	8.2	7.1	12.7	8.6
1000-2500 m	11.0	14.2	20.2	28.2	27.0	38.4	41.9	36.9	34.5	21.7	17.5	13.5
>2500 m	79.3	74.4	70.5	65.5	68.5	57.9	53.6	52.5	56.5	70.7	69.2	77.7

3-4/8

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
0-200 m	0.8	1.7	1.4	0.9	1.0	0.0	0.3	1.2	1.1	1.1	1.9	0.5
200-1000 m	21.4	22.2	20.2	12.8	8.8	9.6	9.7	16.3	18.2	15.2	22.1	21.9
1000-2500 m	22.9	24.5	37.8	41.9	46.8	53.6	55.5	52.5	49.8	34.8	25.9	24.9
>2500 m	54.9	51.7	40.5	44.4	43.4	36.8	34.5	30.0	30.9	48.9	50.0	52.7

5-6/8

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
0-200 m	1.3	1.9	2.7	2.0	0.9	1.0	0.7	1.2	2.3	2.5	3.6	2.6
200-1000 m	27.5	32.1	27.5	16.9	15.4	18.0	17.7	24.5	31.1	26.4	33.7	30.9
1000-2500 m	32.0	26.5	34.4	42.9	49.3	53.2	54.5	47.6	44.5	35.0	26.4	26.8
>2500 m	39.3	39.5	35.4	38.2	34.3	27.7	27.1	26.8	22.1	36.1	36.4	39.7

7-8/8

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
0-200 m	23.6	21.0	25.7	26.7	24.7	23.2	13.9	16.4	15.7	23.8	24.3	20.3
200-1000 m	49.7	48.7	48.2	33.3	29.9	29.2	37.3	40.3	50.4	46.0	52.0	56.1
1000-2500 m	13.6	16.0	14.4	25.6	32.2	32.8	36.6	29.9	24.6	17.3	13.5	14.5
>2500 m	13.1	14.3	11.7	14.5	13.1	14.8	12.3	13.4	9.3	12.9	10.2	9.1

Malung

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
Dimma	0.4	0.2	0.5	1.0	0.6	1.0	0.6	1.0	1.4	2.0	1.6	0.5

0-2/8

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
0-200 m	1.1	0.4	0.2	0.3	0.3	0.2	0.6	0.4	0.7	1.2	0.5	0.8
200-1000 m	10.0	9.8	15.0	9.9	8.7	12.3	16.0	14.7	17.3	15.1	12.8	7.9
1000-2500 m	6.0	6.9	9.2	13.4	23.0	32.1	37.3	26.0	17.3	10.0	5.0	3.9
>2500 m	82.9	83.0	75.6	76.4	68.1	55.3	46.1	58.9	64.7	73.7	81.8	87.4

3-4/8

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
0-200 m	3.4	4.0	1.9	0.4	0.3	0.3	1.2	0.8	1.4	2.5	3.9	1.4
200-1000 m	52.7	45.8	49.3	43.7	34.4	34.6	32.4	37.7	42.2	44.2	45.5	43.2
1000-2500 m	12.3	12.4	20.5	32.2	42.3	45.0	51.2	44.6	34.0	20.8	11.0	19.2
>2500 m	31.5	37.9	28.4	23.7	23.0	20.1	15.1	17.0	22.4	32.5	39.6	36.3

5-6/8

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
0-200 m	0.7	4.1	3.7	0.8	0.5	0.7	0.5	0.7	2.4	3.3	3.8	3.6
200-1000 m	56.8	62.6	60.5	43.9	42.6	41.1	48.6	43.4	51.0	50.6	58.8	59.3
1000-2500 m	17.3	10.2	13.0	31.7	41.3	46.2	37.6	41.9	26.7	14.4	12.2	15.0
>2500 m	25.2	23.1	22.8	23.6	15.6	12.1	13.3	14.0	19.8	31.7	25.2	22.1

7-8/8

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
0-200 m	44.0	36.4	36.6	24.7	16.9	13.4	8.0	17.1	23.2	42.5	47.3	44.4
200-1000 m	39.3	45.4	44.2	50.0	44.2	53.3	56.6	54.4	52.8	39.7	39.6	40.0
1000-2500 m	4.8	6.7	5.8	10.5	24.7	22.3	24.6	17.3	12.9	6.2	3.8	5.4
>2500 m	11.9	11.6	13.5	14.8	14.2	11.0	10.8	11.2	11.1	11.6	9.3	10.2

Vinga

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
Dimma	1.8	2.1	4.3	3.2	1.2	0.4	0.2	0.1	0.2	1.3	1.3	1.0

0-2/8

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
0-200 m	6.0	3.0	1.4	1.6	0.7	1.9	1.1	1.1	0.7	1.2	0.7	1.4
200-1000 m	23.9	21.5	29.7	35.3	36.6	46.8	54.1	59.5	52.9	37.8	36.0	24.1
1000-2500 m	20.3	23.5	22.4	18.9	14.2	15.8	12.3	13.1	21.6	16.0	22.5	24.2
>2500 m	49.8	52.0	46.6	44.2	48.4	35.5	32.5	26.3	24.7	45.0	40.8	50.3

3-4/8

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
0-200 m	3.4	5.4	4.3	6.1	4.6	5.3	2.7	1.2	0.9	2.4	4.5	7.4
200-1000 m	54.2	53.7	56.0	50.2	56.8	65.6	71.4	77.0	66.8	65.4	58.3	49.4
1000-2500 m	32.4	31.3	20.1	23.2	16.7	16.5	17.0	13.5	22.8	26.8	29.5	37.0
>2500 m	10.1	9.5	19.6	20.5	21.9	12.5	8.9	8.3	9.5	5.3	7.7	6.2

5-6/8

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
0-200 m	5.1	6.6	7.9	5.3	3.1	2.3	2.2	3.0	1.9	6.7	5.7	9.4
200-1000 m	67.6	55.7	46.5	49.2	63.0	65.0	69.9	77.9	74.3	65.7	67.1	53.7
1000-2500 m	21.0	26.3	28.7	26.8	24.5	24.0	23.8	14.7	20.4	23.4	21.5	29.5
>2500 m	6.3	11.4	16.8	18.7	9.4	8.7	4.1	4.3	3.4	4.2	5.7	7.4

7-8/8

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
0-200 m	18.0	21.4	21.4	19.7	13.5	9.5	9.2	7.2	6.4	14.6	16.4	20.1
200-1000 m	66.2	63.7	60.8	58.9	60.4	69.7	73.0	77.5	75.3	72.3	70.3	64.3
1000-2500 m	15.4	13.8	16.3	19.6	24.2	18.8	17.2	14.8	17.4	12.4	12.5	14.6
>2500 m	0.4	1.1	1.5	1.7	1.8	2.1	0.6	0.5	0.9	0.7	0.7	1.0

Falsterbo

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
Dimma	4.4	3.6	5.0	3.7	0.9	0.5	0.6	0.4	0.3	1.7	1.7	1.9

0-2/8

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
0-200 m	0.4	0.1	0.4	0.5	0.1	0.2	0.2	0.3	0.1	0.4	0.9	0.4
200-1000 m	31.8	25.4	29.8	23.6	19.0	29.6	30.2	28.3	42.5	36.3	47.3	38.7
1000-2500 m	10.7	10.5	9.6	12.7	12.3	19.7	15.4	15.6	13.1	11.2	9.8	8.3
>2500 m	57.1	64.0	60.2	63.2	68.6	50.5	54.2	55.8	44.2	52.2	42.1	52.6

3-4/8

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
0-200 m	2.4	0.6	0.5	1.4	0.3	0.0	0.3	0.9	0.8	1.8	0.9	1.7
200-1000 m	65.3	48.8	54.5	37.8	36.9	46.6	52.3	50.9	65.6	62.7	67.8	61.5
1000-2500 m	11.4	20.4	17.1	19.1	19.6	24.7	22.1	21.3	12.7	14.0	13.9	8.4
>2500 m	21.0	30.2	27.9	41.7	43.2	28.7	25.4	26.9	20.9	21.5	17.4	28.5

5-6/8

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
0-200 m	1.8	1.8	3.0	1.2	1.7	0.3	0.0	0.6	0.5	1.2	1.4	2.7
200-1000 m	66.8	60.4	55.4	38.8	42.9	53.6	58.4	56.1	68.6	65.6	72.5	65.0
1000-2500 m	14.3	16.0	15.1	23.6	22.0	25.1	20.5	18.3	14.6	15.3	14.4	12.1
>2500 m	17.1	21.9	26.6	36.3	33.3	21.0	21.0	25.0	16.3	17.9	11.7	20.2

7-8/8

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
0-200 m	19.4	14.9	13.2	9.7	9.6	3.5	2.7	2.1	5.9	7.7	12.3	18.6
200-1000 m	67.7	70.1	64.5	54.7	59.0	63.7	65.8	58.8	69.8	66.6	75.5	69.0
1000-2500 m	7.2	9.4	13.6	21.3	20.4	20.6	20.0	24.6	14.0	15.7	8.0	8.1
>2500 m	5.6	5.6	8.7	14.3	11.0	12.2	11.6	14.4	10.4	10.1	4.2	4.3

Jönköping

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
Dimma	1.5	1.5	1.4	3.1	0.8	0.6	0.4	0.8	1.0	3.3	1.5	2.2

0-2/8

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
0-200 m	4.1	3.3	1.1	1.0	0.6	0.8	1.0	1.2	1.2	1.5	2.7	3.3
200-1000 m	28.5	20.9	13.2	10.0	5.0	9.4	9.1	12.7	18.8	20.3	27.8	23.8
1000-2500 m	2.1	2.7	13.3	19.1	23.2	33.9	31.9	28.9	19.5	9.8	4.8	5.2
>2500 m	65.3	73.1	72.4	69.9	71.2	56.0	58.0	57.2	60.5	68.3	64.8	67.7

3-4/8

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
0-200 m	9.7	8.3	3.4	1.5	1.1	1.2	0.6	2.4	3.1	5.5	2.9	5.8
200-1000 m	64.0	45.2	40.2	21.2	17.1	22.7	25.4	26.2	42.3	47.0	55.9	45.8
1000-2500 m	3.3	6.2	18.8	31.1	43.4	48.6	43.1	38.4	28.3	14.4	4.9	10.9
>2500 m	23.0	40.3	37.6	46.1	38.3	27.6	30.9	33.0	26.3	33.2	36.3	37.4

5-6/8

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
0-200 m	14.2	10.3	5.7	3.2	1.5	2.2	2.6	3.2	3.8	4.5	8.3	8.9
200-1000 m	65.4	63.2	59.1	36.9	32.0	35.3	43.4	49.6	60.8	68.3	66.4	61.3
1000-2500 m	3.6	5.8	12.9	24.4	41.6	42.8	36.2	27.8	21.0	9.2	4.9	6.1
>2500 m	16.8	20.8	22.3	35.4	24.8	19.7	17.8	19.4	14.3	18.0	20.4	23.7

7-8/8

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
0-200 m	45.0	39.3	36.2	32.5	19.6	17.0	13.7	17.9	27.1	28.6	42.7	47.8
200-1000 m	51.2	55.7	55.9	45.6	53.5	57.8	59.6	61.2	59.3	63.0	52.5	47.7
1000-2500 m	1.4	1.6	2.6	10.6	16.2	16.3	18.4	10.8	9.0	4.0	1.9	1.8
>2500 m	2.3	3.4	5.3	11.4	10.7	8.9	8.3	10.2	4.6	4.4	2.9	2.6

Vindfördelning på höjd**Vindhastighet Luleå (knop) medel $\pm \sigma$**

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
100 m	19±16	19±16	18±17	17±13	13±8	13±8	12±6	12±6	13±8	18±13	18±12	19±14
200 m	21±16	21±16	19±16	17±13	15±8	13±8	12±6	13±6	14±8	19±12	19±12	21±13
300 m	21±16	21±16	19±16	17±13	15±8	14±8	12±6	13±6	15±8	20±12	19±12	21±13
400 m	22±16	22±15	20±16	18±12	14±8	14±8	12±6	13±6	15±8	20±12	19±12	21±13
500 m	22±16	22±15	20±16	18±12	15±8	14±6	12±6	13±7	15±8	20±12	20±12	22±13
600 m	22±16	22±15	20±16	18±12	15±8	14±8	13±6	13±6	15±8	20±12	20±12	22±13
700 m	22±16	22±16	20±16	18±12	16±9	15±8	13±6	13±7	15±8	21±12	20±12	22±14
800 m	22±16	22±16	20±16	18±12	16±9	15±8	13±6	14±7	15±8	21±12	20±12	23±13
900 m	22±16	22±16	20±16	18±12	15±9	15±8	13±7	14±7	16±8	20±12	20±12	23±14
1000 m	23±16	22±16	21±16	18±13	16±9	16±8	14±7	14±7	16±8	21±12	20±12	23±13
1500 m	24±16	24±16	22±16	22±13	18±10	17±8	16±8	16±10	18±9	23±12	23±13	25±13
2000 m	25±15	25±16	23±16	23±14	20±11	17±9	17±9	17±10	19±9	24±12	23±13	25±13
2500 m	26±16	25±17	24±16	24±14	20±11	17±9	17±9	18±10	18±9	24±13	24±13	26±14
3000 m	34±21	33±20	32±21	32±20	29±21	23±15	22±15	22±14	28±19	32±19	34±21	34±21
3500 m	35±21	34±20	33±21	34±20	33±23	27±18	24±16	24±16	29±19	33±19	34±21	24±21
4000 m	36±22	25±20	33±22	34±21	33±22	27±18	24±16	25±16	30±20	35±20	36±21	36±21
4500 m	36±22	36±21	34±22	35±21	34±22	28±18	25±16	25±16	32±21	36±20	37±21	36±22
5000 m	36±22	37±21	35±22	36±22	35±23	28±18	25±17	25±16	32±21	36±20	37±21	36±21
6000 m	40±24	40±23	39±23	39±23	38±24	34±21	30±19	30±18	37±23	41±24	41±25	40±22
7000 m	42±26	42±23	41±24	42±25	40±25	35±23	31±20	31±19	38±24	45±26	46±27	44±24
8000 m	44±26	44±23	42±24	44±25	42±25	39±22	34±21	35±22	41±24	49±28	46±28	47±25
9000 m	46±27	46±24	43±25	42±25	43±26	38±23	35±22	36±22	42±25	50±28	47±27	48±26
10000 m	49±26	46±24	41±24	37±21	37±23	35±21	35±21	35±22	42±25	47±27	45±26	46±25
11000 m	46±22	43±22	38±23	33±18	28±18	29±19	28±18	30±20	35±22	42±24	41±23	42±22
12000 m	44±19	41±20	35±20	27±16	21±14	19±12	19±14	21±14	26±14	36±19	36±18	39±18
13000 m	44±19	42±19	35±21	26±16	20±12	17±10	16±10	18±11	24±14	33±17	35±17	39±17
14000 m	46±18	43±20	35±21	25±19	17±12	14±8	14±9	16±9	22±12	31±14	34±16	38±15

Vindhastighet Luleå (knop) 50%- och 90%-percentil (50/90% av mätningarna med vind ≤ värdet)

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	Dec
1000 m	19/50	17/46	17/40	17/36	13/27	13/23	13/23	11/23	13/27	19/38	19/38	21/44
3000 m	28/65	25/60	25/62	27/60	21/52	17/38	17/36	17/38	19/40	27/58	27/60	29/60
5000 m	32/69	29/65	25/69	29/65	25/60	19/46	21/48	19/46	21/48	29/62	31/67	31/62
7000 m	38/81	38/73	31/75	32/75	32/71	25/60	25/56	25/58	25/62	36/81	36/87	37/77
9000 m	42/83	38/75	38/81	38/77	34/77	29/71	27/65	27/67	31/73	40/91	38/87	40/83
11000 m	44/79	40/75	32/71	29/58	21/52	19/52	19/56	21/54	23/60	34/73	36/69	38/69
13000 m	44/71	40/71	31/60	23/48	15/31	13/27	13/27	15/32	17/36	29/54	32/52	36/60
16000 m	56/83	54/95	36/77	17/50	13/25	11/19	13/19	13/23	15/29	29/44	32/48	38/62

Vindhastighet Bromma (knop) medel ± σ

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
100 m	17±13	15±10	14±10	13±9	11±7	12±10	10±7	10±7	15±12	16±11	18±13	18±13
200 m	21±13	18±10	16±9	14±9	14±8	14±9	11±7	13±7	17±11	18±10	20±12	21±12
300 m	22±13	19±10	18±9	16±9	14±7	14±9	12±7	14±8	18±11	19±10	22±12	22±12
400 m	23±13	20±10	18±9	15±9	14±7	14±9	12±7	14±8	18±11	20±10	23±12	23±12
500 m	23±13	20±10	18±10	16±9	15±8	15±9	12±7	15±8	18±11	20±10	23±12	23±12
600 m	24±14	21±11	18±10	16±9	15±8	15±9	13±8	15±8	19±11	20±10	23±12	24±12
700 m	24±14	22±11	19±10	16±10	15±8	15±9	13±7	15±8	19±11	20±11	24±12	24±13
800 m	25±14	22±11	19±11	16±10	15±8	16±9	13±8	15±7	19±11	21±11	24±12	24±13
900 m	25±14	21±11	20±10	17±10	15±8	16±10	13±7	15±7	19±11	20±11	24±12	24±13
1000 m	26±14	22±11	20±10	16±9	15±8	16±10	13±8	16±8	19±11	21±11	24±12	25±13
1500 m	25±14	24±14	22±11	18±10	18±11	18±11	14±9	17±8	20±11	24±12	25±13	26±14
2000 m	25±15	24±14	23±12	20±11	20±12	18±11	15±8	18±10	21±12	25±14	26±13	28±16
2500 m	26±15	24±14	24±12	20±10	22±15	19±12	16±9	18±11	22±13	26±14	27±13	29±15
3000 m	37±23	32±21	31±21	30±19	29±19	25±16	21±16	23±15	32±21	33±20	36±21	37±22
3500 m	39±24	34±20	32±21	32±19	32±19	27±17	24±16	28±16	36±22	36±22	37±21	38±23
4000 m	40±25	35±21	33±22	33±20	32±19	28±18	24±16	28±17	36±21	37±22	38±22	39±23
4500 m	40±24	36±21	34±21	34±21	34±20	30±18	26±17	30±17	39±22	39±22	41±22	40±22
5000 m	40±25	36±22	36±22	35±21	36±22	30±18	27±17	30±17	41±22	39±22	40±22	41±24
6000 m	42±25	38±23	39±23	38±22	38±22	36±20	32±19	34±20	43±24	43±25	42±23	43±24
7000 m	45±25	41±23	41±23	41±22	40±22	37±20	32±20	35±20	45±25	44±25	45±25	47±24
8000 m	47±26	41±23	43±25	41±22	41±21	41±22	36±20	39±22	48±26	48±25	46±25	50±24
9000 m	51±26	43±23	44±25	41±21	41±20	42±23	36±20	41±23	50±26	51±27	49±26	50±25
10000 m	50±26	44±23	41±25	38±20	38±19	41±21	38±20	42±22	50±25	50±26	49±26	50±24
11000 m	49±25	42±24	38±21	32±18	30±17	32±19	33±19	37±22	43±22	46±23	44±24	44±20
12000 m	46±22	37±20	32±18	22±13	20±13	22±15	23±15	26±17	34±18	38±18	37±19	39±17
13000 m	44±18	36±20	31±17	22±13	17±11	18±11	20±13	21±14	29±15	34±16	34±17	38±16
14000 m	43±18	35±18	31±17	19±11	14±7	15±8	14±8	17±10	24±12	28±13	31±14	38±14

Vindhastighet Göteborg (knop) medel ± σ

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
100 m	20±14	17±10	19±13	17±10	14±8	12±6	12±8	14±8	15±10	17±10	17±10	20±12
200 m	23±14	21±15	22±14	20±18	15±9	14±9	14±8	15±9	17±10	19±11	20±11	21±12
300 m	24±14	22±15	24±14	21±18	15±9	15±9	14±8	15±9	18±10	20±11	22±11	22±12
400 m	25±14	22±15	24±14	21±18	15±9	15±9	14±8	16±10	18±10	20±11	22±11	23±12
500 m	25±14	23±15	24±14	22±18	16±10	15±8	14±8	16±10	18±10	21±11	23±12	23±12
600 m	25±14	23±15	24±14	21±18	16±10	15±9	14±8	16±10	18±10	21±11	23±12	23±12
700 m	25±14	23±15	24±14	21±18	16±10	16±9	14±9	16±11	18±10	21±11	22±11	23±12
800 m	26±14	23±15	24±14	22±18	16±10	15±9	14±9	16±10	18±10	22±11	23±11	23±12
900 m	26±15	24±15	25±15	22±18	16±10	16±9	14±9	16±10	18±10	22±11	23±11	24±13
1000 m	26±16	24±15	25±14	22±18	16±10	16±9	14±8	17±11	19±10	22±11	23±12	24±12
1500 m	30±17	24±16	25±16	23±18	18±12	17±9	16±10	17±12	22±12	23±13	25±13	25±13
2000 m	31±17	25±17	27±17	25±20	19±13	18±11	17±10	19±12	22±13	23±13	25±13	28±13
2500 m	33±18	26±18	27±17	27±20	19±14	18±11	18±10	19±13	24±14	24±13	25±13	29±14
3000 m	42±25	36±23	35±22	33±23	28±20	27±19	25±17	26±21	32±22	34±21	39±24	39±25
3500 m	43±26	37±24	36±22	35±24	30±20	29±20	26±18	28±21	35±24	37±22	40±24	40±24
4000 m	45±26	39±24	38±23	36±23	31±20	30±21	27±18	29±22	36±24	38±22	41±24	43±25
4500 m	45±26	40±24	40±23	37±25	32±21	32±21	28±19	30±23	38±25	39±24	43±25	44±26
5000 m	45±26	40±25	40±22	38±24	33±21	32±22	28±20	30±23	40±26	39±22	44±26	45±26

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
6000 m	50±29	45±26	44±26	41±24	36±23	37±23	36±24	37±26	45±27	47±26	48±29	48±28
7000 m	53±30	47±28	46±26	43±25	38±22	38±23	37±24	38±26	46±28	47±26	50±28	50±28
8000 m	54±29	49±27	47±26	45±25	39±22	41±24	39±23	41±26	49±28	49±26	52±29	53±28
9000 m	58±30	52±28	49±27	45±25	40±23	41±24	40±23	44±26	52±29	51±27	55±30	56±29
10000 m	58±29	50±28	47±27	41±25	36±22	39±24	41±23	44±26	53±29	50±28	54±29	55±28
11000 m	52±26	47±26	45±25	35±23	30±18	32±22	33±22	38±23	46±25	46±24	48±26	52±26
12000 m	46±23	41±20	36±21	26±18	21±13	22±15	23±16	29±20	35±21	39±21	40±22	44±20
13000 m	45±21	40±20	35±20	24±20	19±11	18±12	18±11	24±18	31±18	35±18	37±18	41±17
14000 m	45±20	39±19	33±19	22±15	17±11	14±10	15±8	19±12	26±14	29±14	34±16	39±17

Vindhastighet Göteborg (knop) 50%- och 90%-percentil

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
1000 m	25/50	23/52	23/50	17/50	13/31	13/23	11/23	13/25	17/29	21/38	21/39	23/40
3000 m	38/73	32/67	31/65	25/71	21/52	17/48	17/46	17/52	23/58	27/64	29/71	32/67
5000 m	40/77	38/73	38/69	31/75	25/62	21/62	19/56	20/65	27/73	31/67	36/73	35/73
7000 m	46/93	42/83	40/81	38/77	31/71	29/69	27/71	29/75	36/83	38/81	42/89	40/85
9000 m	52/98	46/87	44/87	40/77	34/75	36/75	34/73	38/83	44/93	44/91	52/97	46/93
11000 m	48/87	44/83	44/77	29/69	23/54	21/62	25/62	31/69	40/81	40/81	44/83	44/83
13000 m	42/71	40/67	34/64	19/50	15/31	13/29	15/32	15/38	21/52	31/54	32/58	40/64
16000 m	46/77	46/77	36/67	17/48	13/25	11/21	11/23	13/27	17/36	25/42	31/50	36/67

Vindriktning

Vindriktningen ligger generellt omkring väst över Skandinavien med stora variationer i låg nivå (upp till 1500-3000 m beroende på terrängen) och nästan ingen variation på hög nivå (över 12000 m). Vindriktningen varierar mest mellan årstiderna på nivåerna 6000-10000 m beroende på att tropopaushöjden varierar i huvudsak mellan de nivåerna och beror på vilken luftmassa som berör ett område. Sommartid kommer ofta varma luftmassor in söderifrån med hög tropopaus som följd och vintertid kalla luftmassor norr- eller nordost ifrån med låg tropopaus som följd. Vid övergången mellan i huvudsak varma luftmassor till i huvudsak kalla luftmassor är vindarna mer variabla än annars, med stor spridning av vindriktningarna.